



**OPTIMASI WADUK MENGGUNAKAN
PROGRAM DINAMIK STOKASTIK
(Kasus Waduk Saguling Jawa Barat)**

TESIS

**Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil**

Oleh

**APRIZAL
NIM : L4A000002**

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

2003





JPT-PUSTAK-UNDIP	
No. Daft:	2013/17 MT3/24
Tgl.	28 AS '03

**OPTIMASI WADUK MENGGUNAKAN
PROGRAM DINAMIK STOKASTIK
(Kasus Waduk Saguling Jawa Barat)**

Disusun oleh

**APRIZAL
NIM : L4A000002**

Dipertahankan di Depan Penguji Tanggal :

14 Maret 2003

**Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
Memperoleh gelar Magister Teknik Sipil**

Tim Penguji :

Ketua : Dr. Ir. Suharyanto, M.Sc

Sekretaris : Ir. Hari Nugroho, MT

Anggota :

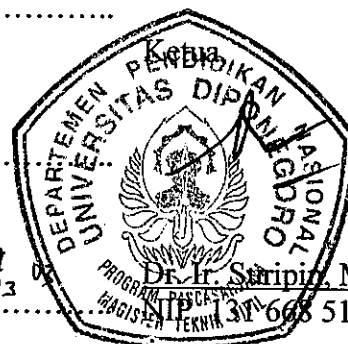
Semarang, 14 Maret 2003

1. Dr. Ir. Suripin, M. Eng

**Magister Teknik Sipil PPs
UNDIP**

2. Ir. Sri Sangkawati, MS

3. Ir. Hary Budienny, MT



ABSTRAKS

Meningkatnya kebutuhan energi listrik terutama di Jawa-Bali, menimbulkan permasalahan dalam upaya pemenuhannya. Berbagai upaya harus dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan memperhatikan berbagai kendala yang dihadapi, dampak negatif yang ditimbulkan dan penyelesaian diharapkan bersifat efektif dan efisien.

Di antara berbagai alternatif yang ada, maka penelitian untuk mengoptimasi dan menganalisa kinerja waduk Saguling (termasuk dalam jaringan PLN inter koneksi Jawa-Bali) menjadi pilihan. Metode pengoptimasian waduk Saguling ini menggunakan program dinamik stokastik dan dilanjutkan dengan simulasi. Keberhasilan teknik optimasi ditunjukkan oleh kinerja waduk berupa keandalan (*releability*), kelentingan (*resiliency*), kerawanan (*vulnerability*). Pada simulasi waduk ini diasumsikan mengalami kegagalan apabila release optimasi tidak bisa memenuhi sebagian Target Pelepasan (*demand*) yang ditentukan.

Dari penelitian yang telah dilakukan, penerapan teknik analisa sistem menggunakan program dinamik stokastik ini sangat membantu pengoptimalan pengoperasian waduk. Terlihat dari produksi listrik rata-rata tahunan hasil pola operasi optimasi yang mengalami peningkatan dibandingkan dengan pola operasi eksisting sebesar 21,29 % dari 2.385 GWH menjadi 2.892 GWH.

Sedangkan dari simulasi waduk yang memeriksa kinerja waduk Saguling dengan berdasarkan pola pengoperasian optimal, waduk memiliki tingkat keandalan 91,67 % mengindikasikan bahwa terjadi kegagalan sebesar 8,83 %. Untuk kembali ke kondisi sukses dibutuhkan waktu 1 bulan karena kelentingannya besar yaitu 1. Besarnya *deficit ratio* dari besarnya target pelepasan dalam pemenuhan kebutuhan adalah 0,085 yang mengindikasikan hanya 0,85 % kebutuhan air dari PLTA tidak terpenuhi pada suatu kegagalan. Nilai maksimum *deficit ratio* adalah 0,37 dan besarnya *deficit* dari waduk Saguling maksimum adalah 26,408 m³/det.

Sehingga pemakaian program dinamik stokastik yang dikaitkan dengan penggunaan pemodelan simulasi dapat dijadikan acuan dalam menyusun rencana pengoperasian waduk dan memberikan jaminan bagi berkesinambungnya operasional waduk lebih efektif dan terandalkan dalam pemenuhan kebutuhan konsumsi listrik.

Kata kunci : program dinamik stokastik, simulasi, analisa sistem, pola operasi optimasi, pola operasi eksisting, keandalan, kelentingan, kerawanan.

ABSTRACT

The increasing needs of electric power, especially at Java-Bali, cause some problems in its fulfillment. Many efforts must be done to overcome those problems by considering many handicaps that will be faced, negative effect that occur and also its settlement must be effective and efficient.

Among the available alternatives, the study use optimization technique and analyze performance of Saguling reservoir (included in a Java-Bali PLN interconnection net work) become a choice. Optimizing method use in the study is a stochastic dynamic program and continued with simulation. Success of optimizing technique was shown by performance of reservoir in form of reliability, resiliency, and vulnerability. On the simulation, reservoir was assumed to undergo a failure if release optimizing can not fulfill half demand that has been determined.

The study shows that, the application of system analyzes technique (stochastic dynamic program) is very helpful to optimize the operation of reservoir. The annual average electric product, resulted from optimization increases and better than the existing operation pattern by 21.29 % from 2,385 GWH to 2,892 GWH.

From simulation that calculate the performances of Saguling reservoir based on optimize operation pattern, the reservoir has reliability level of 91.67 % indicating there is 8.33 % of failures. After a failure in order to return to previous success condition, it will take 1 month because of its big resiliency. The amount of deficit ratio from the amount of target release is 0.085 indicating that only 0.85 % water supplied from PLTA can not fulfilled the target release in the time of failure. Maximum value of deficit ratio is 0.37 and the maximum deficit amount of Sanguling reservoir is 26.408 m³/sec.

So that, the application of stochastic dynamic program that is combined with the simulation model can be used as a guides in analyzing the operation policy of a reservoir and give guarantee of the continuous operational in fulfilling the electric consumption needs.

Keywords : stochastic dynamic program, simulation, system analysis, optimizing operation pattern, existing operation pattern, reliability, resiliency, vulnerability.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas nikmat yang telah dikaruniakan tiada terkira, hanya berkat Taufik dan Hidayah-Nya Tesis ini dapat diselesaikan dan diajukan sebagai persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Pasca Sarjana Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih yang tak terhingga kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan moril dan materiel dalam menuntut ilmu dan penyelesaian tesis ini.

Ucapan terimakasih ini kami haturkan kepada Bapak Dr. Ir. Suripin, M.Eng sebagai Ketua Program Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk belajar di Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro. Bapak Dr. Ir. Suharyanto, M. Sc dan Ir. Hari Nugroho, MT selaku pembimbing yang telah dengan tulus membimbing penulis dan memberi bekal ilmu selama dalam penyelesaian tesis ini. Serta kepada Ibu Ir. Hary Budienny, MT dan Ibu Ir. Sri Sangkawati, MS yang telah bersedia memberikan sumbangan pemikiran dalam membahas dan menguji tesis ini.

Kepada Bapak Drs. Hi. RM Barusman dan Ibu Dra. Sri Hadiyati Barusman, sebagai Rektor Universitas Bandar Lampung dan Ketua Yayasan Administrasi Lampung yang telah menugaskan dan memberi kesempatan kepada penulis untuk menuntut ilmu dan mengembangkan wawasan di Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro kami haturkan banyak terima kasih.

Ucapan terima kasih kami tujukan pula pada para dosen dan staff serta sivitas Akademika Universitas Diponegoro yang telah memberikan ilmu, bimbingan dan pelayanan yang baik juga ramah kepada penulis selama menempuh studi dan penyusunan

tesis, rekan-rekan mahasiswa Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro atas dukungan dan kerja samanya selama ini dan tidak lupa kepada PT. PLN Unit Pembangkit Saguling yang telah membantu dalam pemberian data dan informasi yang berkaitan dengan studi tesis ini.

Secara khusus penulis haturkan rasa terima kasih yang teramat mendalam kepada Ayah dan Bunda serta Bapak dan Ibu mertua atas dorongan dan do'anya yang tulus tiada hentinya bagi penulis. Teruntuk dr. Sukarti, Istri tercinta dan Arroyyan putra tersayang atas dorongan, kesabaran, dan pengorbanan selama ini yang semua itu sebagai bara penyemangat dalam mengokohkan langkah hati ini dan kepada adik-adikku juga segenap keluarga atas dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan dan tak luput dari kesalahan, oleh sebab itu, kritik dan saran dari pembaca untuk kesempurnaan tesis ini sangat penulis harapkan.

Akhir kata penulis berharap semoga tesis ini memberikan sumbangan yang berarti bagi dunia pengetahuan dan penelitian di Indonesia khususnya bidang Manajemen Sumber Daya Air.

Semarang, Maret 2003

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

Lembar Pengesahan	
Abstraks.....	<i>i</i>
Kata Pengantar.....	<i>iii</i>
Daftar Isi.....	<i>v</i>
Daftar Tabel.....	<i>vii</i>
Daftar Gambar	<i>viii</i>
Daftar Lambang, Notasi dan Singkatan	<i>x</i>
Daftar Lampiran	<i>xii</i>
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan dan Batasan Masalah	3
1.3 Maksud dan Tujuan	5
1.4 Lingkup Penelitian.....	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Waduk	8
2.2 Fenomena Aliran Inflow	10
2.2.1 Proses Stokastik	12
2.2.2 Proses Markov	13
2.3 Analisa Sistem	14
2.4 Teknik Optimasi	15
2.5 Program Dinamik dalam Optimasi Waduk	20
2.5.1 Prinsip Program Dinamik.....	21
2.5.2 Program Dinamik Stokastik	22
2.6 Listrik Tenaga Air.....	28
2.7 Kinerja Pengoperasian Waduk	30
2.7.1 Keandalan (<i>reliability</i>)	31
2.7.2 Kelentingan (<i>resiliency</i>)	33
2.7.3 Kerawanan (<i>vulnerability</i>).....	35
BAB III METODOLOGI	
3.1 Desain Penelitian	36
3.2 Data	38
3.3 Penyusunan Model Program Dinamik Stokastik.....	38
3.3.1 Diskritisasi Debit Masukan (Inflow)	42
3.3.2 Matrik Probabilitas Transisi Inflow	43

3.3.3	Diskritisasi Tampunguan Waduk	45
3.3.4	Perhitungan Kinerja Sistem.....	48
3.3.5	Perhitungan Persamaan Rekursif.....	48
3.3.6	Penentuan Kondisi Steady State.....	49
3.4	Prosedur Optimasi Program Dinamik Stokastik.....	50
3.5	Model Simulasi.....	52
3.6	Analisa Unjuk Kerja	55
 BAB IV KOMPILASI DATA		
4.1	Gambaran Umum Daerah Studi	57
4.2	Pengelolaan Waduk Eksisting.....	61
4.3	Karakteristik PLTA Saguling.....	63
4.3.1	Produksi Listrik PLTA Saguling.....	63
4.3.2	Data Teknis.....	65
4.3.3	Data Pendukung.....	68
 BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		
5.1	Data Masukan Program.....	69
5.1.1	Data Diskritisasi Debit Inflow.....	69
5.1.2	Data Diskritisasi Tampunguan Waduk.....	71
5.1.3	Data Evaporasi.....	72
5.1.4	Data Target Tampunguan dan Target Pelepasan.....	73
5.2	Output Program Optimasi Dinamik Stokastik.....	74
5.2.1	Matrik Probabilitas Inflow	75
5.2.2	Pola Operasi Waduk Optimasi	75
5.2.3	Pola Pelepasan Air (Release) Waduk	77
5.3	Program Simulasi.....	78
5.3.1	Pola Operasi Optimasi dan Eksisting.....	78
5.3.2	Produksi Energi Listrik Optimasi dan Eksisting	82
5.3.3	Kondisi Tampunguan Waduk Eksisting dan Optimasi.....	87
5.3.4	Kinerja Waduk.....	91
 BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		
6.1	Kesimpulan.....	96
6.2	Saran	97
 DAFTAR PUSTAKA		 98
LAMPIRAN		101

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Matrik Probabilitas Transisi Debit Inflow pada Waduk	24
Tabel 2.2 Matrik Kebijakan Operasi Waduk.....	28
Tabel 3.1 Data Teknis Waduk Saguling untuk Simulasi	55
Tabel 4.1 Pola Operasi Waduk Saguling Rencana dan Realisasi Tahun 2001	61
Tabel 4.2 Produksi Listrik PLTA Saguling Tahun 1986-2001	63
Tabel 4.3 Data Teknis Waduk.....	65
Tabel 5.1 Diskritisasi Inflow Tiap-tiap Bulan yang Masing-masing Dibagi Dalam 3 Kelas (Satuan MCM)	70
Tabel 5.2 Diskritisasi Tampungan (<i>storage</i>) Waduk Saguling (MCM)	72
Tabel 5.3 Laju Evaporasi Rata-rata (MCM)	73
Tabel 5.4 Target Pelepasan (m^3/det dan MCM)	74
Tabel 5.5 Matrik Probabilitas Transisi Kejadian Inflow di Bulan Pebruari sebagai Fungsi Inflow di Bulan Januari	75
Tabel 5.6 Pola Kebijakan Tampungan Akhir Bulan yang Merupakan Fungsi Kelas Tampungan Awal Bulan dengan Kelas Inflow Bulan Januari	76
Tabel 5.7 Pola Pelepasan Air Waduk (Juta m^3 atau MCM) yang Merupakan Fungsi Tampungan Awal Bulan dengan Inflow Bulan Januari	77
Tabel 5.8 Rekapitulasi Perhitungan Kinerja Waduk Saguling	95

DAFTAR GAMBAR

		Halaman
Gambar 2.1	Diagram Urutan Pentahapan Optimasi	27
Gambar 2.2	Diagram Untuk Menentukan Energi yang Dihasilkan Turbin	29
Gambar 3.1	Bagan Desain Penelitian	37
Gambar 3.2	Bagan Perhitungan Probabilitas Transisi Inflow.....	44
Gambar 3.3	Perbandingan 3 Macam Skema Dipergunakan Dalam Pendiskritisasian Tampungan Waduk.....	47
Gambar 3.4	Bagan Alir Model Program Dinamik Stokastik.....	51
Gambar 3.5	Kurva Hubungan Antara Elevasi Waduk dengan Volume Aktif Waduk...	54
Gambar 3.6	Bagan Alir Model Simulasi dan Analisa Unjuk Kerja Waduk	56
Gambar 4.1	Peta DAS Saguling Jawa Barat.....	57
Gambar 4.2	Peta Lokasi Ketiga Waduk di Jawa Barat.....	58
Gambar 4.3	Peta Situasi PLTA Saguling.....	60
Gambar 4.4	Pola Operasi Waduk Saguling Rencana dan Realisasi Tahun 2001.....	62
Gambar 4.5	Produksi Listrik PLTA Saguling Tahun 1996 – 2001.....	64
Gambar 4.6	Denah Kerja PLTA Saguling.....	67
Gambar 5.1	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1996	79
Gambar 5.2	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1997	80
Gambar 5.3	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1998	80
Gambar 5.4	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1999	81
Gambar 5.5	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2000.....	81
Gambar 5.6	Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2001.....	82
Gambar 5.7	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1996	83

Gambar 5.8	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1997	83
Gambar 5.9	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1998	84
Gambar 5.10	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1999	84
Gambar 5.11	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2000.....	85
Gambar 5.12	Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2001.....	85
Gambar 5.13	Perbandingan Produksi Listrik Total Hasil Simulasi Waduk Eksisting dan Optimasi Tahun 1996 - 2001.....	86
Gambar 5.14	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 1996.....	87
Gambar 5.15	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 1997.....	88
Gambar 5.16	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 1998.....	88
Gambar 5.17	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 1999.....	89
Gambar 5.18	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 2000.....	89
Gambar 5.19	Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Optimasi dengan Eksisting Tahun 2001.....	90

DAFTAR LAMBANG, NOTASI DAN SINGKATAN

A. Lambang dan Notasi

A_{ij}	-	: Koefisien fungsi kendala ke-i variabel ke-j
B_m	-	: Nilai ruas kanan dari persamaan kendala ke-m yang menunjukkan nilai syarat kendala tersebut
$B_{k,i,t}$	-	: Kinerja sistem
C_j	-	: Koefisien fungsi tujuan variabel ke-j
D_t	[MCM]	: Demand pada waktu ke-t
E	-	: Menyatakan nilai harapan (<i>expectation</i>)
$E_{k,i,t}$	[MCM]	: Kehilangan air yang mungkin melalui evaporasi dan seepage (rembesan)
$F_t(k,i)$	-	: Nilai fungsi objektif jika volume waduk di kelas k, volume inflow di kelas i, pada waktu ke t.
$F_{t+1}^*(l,j)$	-	: Nilai fungsi objektif jangka panjang (<i>long term periode</i>) yang diperoleh pada periode waktu t+1 jika volume waduk pada awal periode waktu t+1 berada di kelas l dan inflow berada di kelas j.
HWL	[m]	: Muka air waduk maksimum
h	[m]	: Tinggi jatuh rata-rata yang merupakan fungsi volume.
LWL	[m]	: Muka waduk minimum
MWL	[m]	: Muka air rata-rata
P_{ij}^{t+1}	-	: Matrik probabilitas transisi inflow dari periode/bulan i ke periode/bulan j.
P	[KW]	: Tenaga yang dihasilkan
Q	[m ³ /det]	: Debit yang digunakan
$Q_{i,t}$	[m ³ /det]	: Inflow pada periode yang sedang berlangsung
$R_{k,i,l,t}$	[m ³ /det]	: Pelepasan waduk,
Rmin	[MCM]	: Pelepasan air waduk minimal yang disyaratkan
Rmax	[MCM]	: Pelepasan air waduk maksimal yang disyaratkan
$S_{k,t}$	[MCM]	: Tampungan pada periode yang sedang berlangsung
$S_{l,t+1}$	[MCM]	: Tampungan waduk pada periode akan datang
Spillt	[MCM]	: Pelimpasan dari waduk selama bulan t
Smin	[MCM]	: Tampungan minimal yang disyaratkan
Smax	[MCM]	: Tampungan maksimal yang disyaratkan
TWL	[m]	: Muka air belakang waduk
T_{gagal}	-	: Keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi
Wt	-	: Menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan
X_j	-	: Variabel keputusan ke-j
Z	-	: Fungsi Tujuan
i	-	: 1, 2, ..., m (indeks untuk jumlah variabel kendala)
j	-	: 1, 2, ..., n (indeks untuk jumlah variabel keputusan)
α_1	-	: Jangka waktu rata-rata waduk berada dalam kondisi gagal
γ	-	: Efisiensi turbin

η	[kg /m ³]	: Berat jenis air
ρ	-	: Menunjukkan probabilitas (rerata frekuensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan
$\sum_{t=1}^n Z_t^2$	-	: Jumlah total waktu waduk mampu memenuhi kebutuhan ($R_t \geq D_t$) untuk definisi keandalan ke-2
$\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^2)$	-	: Jumlah total waktu waduk tidak mampu memenuhi kebutuhan ($R_t < D_t$) untuk definisi keandalan ke-2

B. Singkatan

BMG	: Badan Meteorologi dan Geofisika
CAP	: <i>Capacity</i> = Kapasitas
DAS	: Daerah Aliran Sungai
GI	: Gardu Induk
GITET	: Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi
GWH	: Giga Watt Hour = 1×10^9 KWH
LFC	: <i>Load Frekuensi Control</i>
KWH	: Kilo Watt Hour
MA	: Muka Air
MCM	: <i>Million Cubic Meter</i> = Juta meter Kubik = 1×10^6 m ³
MWH	: Mega Watt Hour = 1×10^6 KWH
OF	: <i>Objective Function</i> (fungsi tujuan)
PUSLITBANG	: Pusat Penelitian dan Pengembangan
P3B	: Pusat Pengaturan dan Pengendalian Beban
PJT	: Perum Jasa Tirta
PLN	: Perusahaan Listrik Negara
PLTA	: Pembangkit Listrik Tenaga Air
SPK – TPA	: Sekretariat Pelaksana Koordinasi Tata Pengaturan Air
SUTET	: Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi
TEEG	: Produksi listrik tahunan yang diharapkan
TEG _t	: Produksi listrik selama bulan t
TMA	: Tinggi Muka Air
TR _t	: <i>Target Release t</i> = Target pelepasan pada waktu t
TS _t	: <i>Target Storage t</i> = Target tampungan pada waktu t
Z	: Zona tampungan

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A <i>Listing Program</i> Optimasi dan Simulasi Waduk Saguling	101
Lampiran B Debit Inflow DAS yang masuk DAM Saguling Tahun 1928 – 2001	132
Lampiran C Diskritisasi Inflow 12 Periode dengan 3 Kelas	136
Lampiran D Tabel-tabel Matrik Probabilitas Transisi Inflow	138
Lampiran E Tabel-tabel Pola Kebijakan Tampungan Akhir (<i>Final Storage</i>) yang merupakan Fungsi dari Hubungan Antara Tampungan Mula-mula (<i>Initial Storage</i>) dan Inflow pada Bulan Tertentu	142
Lampiran F Tabel-tabel Kebijakan Pelepasan (<i>Release</i>) Air yang merupakan Fungsi dari Hubungan Antara Tampungan Mula-mula (<i>Initial Storage</i>) dan Inflow pada Bulan Tertentu	154
Lampiran G Simulasi Waduk Saguling Tahun 1996 – 2001	166
Lampiran H Perbandingan Tinggi Elevasi Muka Air Waduk Saguling Kondisi Eksisting dengan Hasil Optimasi Selama 6 Tahun (Tahun 1996-2001)...	170
Lampiran I Contoh Pola Operasi Waduk Eksisting (Rule Curve) Waduk Saguling Selama 6 Tahun (Tahun 1996-2001).....	171

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan bertambahnya penduduk dan penggunaan berbagai peralatan yang serba elektrik, baik untuk keperluan rumah tangga, perkantoran, pertokoan maupun industri. Hal ini berdampak dengan semakin tipisnya pasokan terhadap energi listrik tersebut. Salah satu sinyal dari semakin tipisnya pasokan energi listrik ini ditunjukkan dari besarnya cadangan kapasitas pembangkitan sistem inter koneksi Jawa-Bali pada tahun 2003 hanya tinggal 29 persen karena beban puncaknya telah mencapai 14.397 Mega Watt (MW) dari kapasitas 18.608 MW, di bawah batas minimum 30 persen cadangan operasional yang seharusnya tersedia (PT. PLN, 2002).

Berbagai upaya harus ditempuh untuk menambah pasokan terhadap kebutuhan energi listrik ini. Pembangunan waduk atau bendungan merupakan salah satu alternatif pemenuhan kebutuhan energi ini melalui Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Hal ini memungkinkan karena Indonesia memiliki potensi 75.000 MW bagi pembangkitan listrik tenaga air, yang saat ini masih dapat ditingkatkan penggunaannya (PT. PLN, 1992).

Pilihan PLTA sebagai pemasok energi listrik karena PLTA relatif murah, tidak perlu membeli air sebab air telah tersedia di alam, biaya operasi yang rendah, relatif tidak memerlukan waktu awal (*start-up time*) dalam pengoperasian dan tidak menimbulkan polusi atau ramah lingkungan, berbeda dari pembangkit-pembangkit listrik lain.

Salah satu propinsi di pulau Jawa yaitu Jawa Barat memiliki potensi energi listrik tenaga air yang cukup besar yaitu kurang lebih 5.600 MW dan yang telah dimanfaatkan

hanya 35 persennya saja atau sekitar 1.850 MW. Energi listrik tenaga air ini dipasok melalui PLTA Jatiluhur 150 MW, PLTA Saguling 700 MW, PLTA Cirata I 500 MW dan PLTA Cirata II 500 MW (PT. PLN, 1982, Nugroho, 1999; Gunawan, 2002).

Pembangun sebuah waduk atau bendungan besar sebagai upaya pembangkitan listrik melalui tenaga air (*Hydro Power*) tersebut akan berhadapan dengan berbagai permasalahan kompleks, baik masalah ekonomi, sosial maupun budaya seperti pembiayaan proyek akibat krisis ekonomi yang belum berakhir, pembebasan lahan berhektar-hektar dan pemindahan penduduk dalam jumlah yang sangat besar.

Alternatif lain dari upaya penanggulangan krisis listrik ini adalah dengan mengoptimalkan pengoperasian dan pengelolaan waduk-waduk yang telah ada, sehingga didapatkan hasil yang semaksimal mungkin. Ada terdapat beberapa teknik optimasi yang sering dipergunakan dalam pengoptimasian Sumber Daya Air, masing-masing teknik optimasi tersebut memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri dibandingkan dengan yang lain. Review teknik-teknik optimasi dan simulasi pada pengoperasian waduk ini diulas oleh Yeh (1985) dan Loucks (1981).

Dari berbagai teknik optimasi yang ada maka optimasi menggunakan Program Dinamik Stokastik menjadi suatu pilihan karena beberapa kelebihan yaitu : teknik ini dapat digunakan merangkum sasaran dan kendala yang bersifat non linier, dapat mengakomodasi fenomena stokastik dari inflow sungai, dapat menghasilkan pola pengoperasian waduk dengan tahapan-tahapan keputusan yang lebih baik (Yeh, 1985). Sehingga pola operasi waduk yang dihasilkan dari optimasi tersebut diharapkan menjadi efektif (*effectiv*) dan andal (*reliabel*).

Mempertimbangkan berbagai uraian di atas maka penelitian ini ditujukan untuk mengoptimalkan pengoperasian waduk dengan menggunakan program dinamik stokastik yang diasumsikan akan efektif, realistis dan ekonomis dari segi pembiayaannya saat ini.

1.2 Rumusan dan Batasan Masalah

Propinsi Jawa Barat seperti yang telah dijelaskan di atas memiliki 3 waduk utama yaitu waduk Saguling, waduk Cirata dan waduk Juanda (Jatiluhur). Ketiga waduk ini dikelola oleh institusi yang berbeda, waduk Saguling dan Cirata dikelola oleh PT. PLN karena fungsi utamanya adalah pembangkit listrik, sedangkan waduk Jatiluhur dikelola oleh PJT Jatiluhur berfungsi sebagai pemenuhan irigasi dan penggelontoran perkotaan di Jakarta juga berfungsi sebagai PLTA.

Penentuan kebijakan pengoperasian ketiga waduk tersebut saat ini diatur oleh suatu tim yang dikenal dengan SPK TPA (Sekretariat Pelaksana Koordinasi Tata Pengaturan Air). Tim ini akan menghasilkan suatu pedoman pengoperasian waduk bersama-sama berupa pola operasi (*rule curve*) waduk (Perum Otorita Jatiluhur, 1995).

Pola pengoperasian berupa *rule curve* ini memiliki beberapa kelemahan diantaranya adalah (Loucks, 1981 dan Wurbs, 1996) :

1. Secara periodik harus selalu disesuaikan dengan perkembangan musim dan kondisi pengoperasian.
2. Kurang sesuai untuk regim inflow yang memiliki variasi musiman yang sangat besar.
3. Hanya berlaku untuk kondisi-kondisi pengoperasian normal.
4. Perubahan pelepasan sering terlalu besar pada kondisi pengoperasian non-normal hingga dapat menyebabkan *overshooting* dan *undershooting*.

Kelemahan-kelemahan pola pengoperasian waduk menggunakan *rule curve* seperti diuraikan di atas perlu dilakukan evaluasi dan perlunya penggunaan teknik pemodelan pengoperasian waduk yang secara eksplisit mampu merepresentasikan keadaan pengoperasian sesungguhnya sehingga dapat dicari solusi dari kelemahan-kelemahan tersebut.

Ditambah lagi adanya perubahan yang terjadi pada *land use* bagian hulu sungai Citarum, proses sedimentasi yang terus berlangsung, berbagai aktivitas yang mengganggu ekosistem dan berbagai fenomena alam saat ini, seperti pemanasan global menyebabkan berkurangnya efektifitas waduk dalam mencapai tujuannya. Yakni waduk yang semestinya dapat menampung air pada musim hujan dan mengairi pada musim kemarau malah menjadi antagonis keadaannya.

Secara prinsip, dewasa ini ada beberapa cara penentuan pola atau kebijakan pengoperasian waduk, cara-cara tersebut adalah: 1) Pembagian zona peruntukan serta dengan cara pola operasi (*rule curve*), 2) Pola Pengoperasian Baku (*Standard Operating Policy*, SOP), 3) Program dinamik deterministik atau *implicit stokastik*., 4) Program Linier dan 5) Program dinamik stokastik (Suharyanto, 1997).

Melihat kondisi di atas maka penentuan pola pengoperasian dengan menggunakan teknik optimasi program dinamik stokastik dan simulasi menjadi pilihan dan diharapkan dapat mengatasi berbagai permasalahan dan kendala yang timbul pada pengoperasian waduk.

Studi ini hanya meninjau waduk Saguling saja dan menganggap waduk Saguling ini sebagai suatu sistem waduk tunggal/parsial, berbeda dengan keadaan saat ini yang telah memiliki sistem *cascade serial* dengan waduk yang lain sepanjang sungai Citarum seperti yang telah dikemukakan sebelumnya. Pada sistem *cascade serial* ini, keputusan dalam

penetapan pengoperasian waduk di sebelah hulu akan sangat berpengaruh dengan waduk di sebelah hilir. Pelepasan air yang tidak terkontrol akan dapat menimbulkan dampak negatif pada salah satu waduk.

Keputusan untuk meninjau waduk Saguling sebagai waduk tunggal/persial ini dimaksudkan *pertama* karena penerapan teknik optimasi program dinamik stokastik memerlukan perhitungan dan analisa yang mendalam sehingga dibutuhkan kecermatan dalam melihat permasalahan tersebut, *kedua* waduk Saguling terletak paling hulu diantara waduk yang ada sehingga proses perhitungan tidak dipengaruhi oleh waduk yang lain namun tetap memperhatikan kebutuhan dari waduk di bawahnya, dan yang *ketiga* adalah waduk Saguling memiliki kapasitas pembangkit listrik terpasang lebih besar dari waduk yang di bawahnya sehingga pengoptimalan pemakaiannya menjadi suatu yang diprioritaskan.

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah :

1. Merumuskan pemodelan pengoperasian waduk dengan program dinamik stokastik.
2. Memperoleh perbaikan pada pola / kebijakan pengoperasian waduk.
3. Meningkatkan pemanfaatan air waduk Saguling secara lebih rasional.

Tujuan dari penelitian ini adalah :

Menghasilkan pola pengoperasian waduk Saguling yang memperhatikan sifat stokastik inflow dengan program dinamik stokastik

1.4 Lingkup Penelitian

Penelitian ini mencakup kegiatan-kegiatan sebagai berikut:

1. Pemodelan pengoperasian waduk dengan program dinamik stokastik.
2. Perumusan pedoman pengoperasian waduk berdasarkan hasil optimasi Program Dinamik Stokastik
3. Simulasi pengoperasian waduk dengan menerapkan pedoman pengoperasian hasil optimasi dan pedoman pengoperasian eksisting.
4. Analisis kinerja waduk.

1.5 Sistematika Penulisan

Bab 1. Pendahuluan

Pada bagian pendahuluan ini terdiri dari latar belakang, rumusan permasalahan, maksud dan tujuan penelitian, lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

Dalam tinjauan pustaka terdapat uraian umum tentang waduk, fenomena aliran sungai, proses stokastik dan proses Markov, penjelasan tentang analisa sistem, program dinamik dalam optimasi waduk, prinsip program dinamik, program dinamik stokastik, uraian tentang PLTA dan tinjauan terhadap kinerja pengoperasian waduk, berupa : keandalan (*releability*), kelentingan (*resiliency*), kerawanan (*vulnerability*).

Bab 1. Pendahuluan

Bab 3. Metodologi

Dalam bab ini diuraikan mengenai metodologi yang dipakai dalam penelitian ini diuraikan sebagai berikut : desain penelitian, pengumpulan data, penyusunan model berupa diskritisasi debit masukan (*inflow*), diskritisasi tampungan waduk, probabilitas transisi inflow, formulasi program dinamik stokastik, prosedur optimasi program dinamik stokastik dan model simulasi.

Bab 4. Kompilasi Data

Berisi tentang gambaran umum daerah studi, tinjauan pengelolaan waduk eksisting dan karakteristik waduk Saguling.

Bab 5. Hasil dan Pembahasan

Berisi tentang data masukan untuk program, hasil penelitian dari perhitungan program dinamik stokastik berupa probabilitas transisi inflow, pedoman operasi optimal, pola pelepasan air waduk, hasil simulasi waduk dengan pola operasi eksisting dan waduk yang menggunakan pola operasi optimasi.

Bab 6. Kesimpulan dan Saran

Berisi tentang beberapa kesimpulan yang didapat dari penelitian dan saran-saran bagi pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Waduk

Waduk adalah suatu *barrier* yang dibangun melintang pada penampang sungai, sehingga menyebabkan air tertahan dan mengakibatkan terjadinya genangan air (Garg, 1982). Air yang ditampung itu dapat dipergunakan dan dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dan kebutuhan makhluk hidup.

Berdasarkan penggunaannya, waduk dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Waduk Konservasi atau tampungan, berguna untuk mengatasi masalah-masalah pemanfaatan air sungai agar tetap berkesinambungan pada saat kemarau ataupun pada debit sungai tinggi bagi pemenuhan berbagai kebutuhan seperti kebutuhan air minum, irigasi ataupun pembangkitan listrik.
2. Waduk Pengendali Banjir, berguna untuk menampung sebagian debit banjir sedemikian rupa sehingga mengurangi tinggi puncak banjir pada daerah hilir yang hendak dilindungi dari bahaya banjir.
3. Waduk Distribusi merupakan bendungan tampungan/reservoir kecil yang berguna untuk menyimpan air saat pemakaian air di kota minimal, dan sebaliknya akan mengalirkan air saat pemakaian air berlebih.
4. Waduk Multiguna, direncanakan dan dibangun dengan tujuan untuk memenuhi segala kebutuhan secara bersamaan baik itu untuk melindungi dari bahaya banjir, irigasi, air minum, konservasi, industri, PLTA dan sebagainya.

Melihat berbagai kegunaan waduk di atas maka umumnya waduk memiliki konstruksi yang sangat besar agar dapat menampung volume air dalam jumlah jutaan meter kubik, sehingga hal ini dapat menyebabkan berbagai kendala pada fungsi pengawasannya. Untuk memudahkan dalam pengamatan dan fungsi pengawasan waduk tersebut maka waduk dibedakan dalam berbagai tingkatan zona tampungan atau level/elevasi yang menunjukkan kondisi tertentu pada waduk. Zona tampungan atau level tersebut adalah sebagai berikut (Garg, 1982) :

1. Level Genangan Normal atau Level Konservasi Maksimum, adalah elevasi maksimum yang akan tercapai oleh muka air selama kondisi pengoperasian normal.
2. Level Genangan Minimum adalah elevasi muka air terendah yang harus dipertahankan selama kondisi pengoperasian normal. Level ini dapat ditentukan oleh elevasi outlet terendah pada waduk ataupun juga oleh *minimum head* yang dibutuhkan agar bekerja secara efisien.
3. Tampungan Aktif adalah volume air yang tersimpan di dalam waduk antara Level Genangan Minimum dan Level Genangan Normal. Volume tampungan aktif pada waduk multiguna dapat dibagi ke dalam volume konservasi dan volume pengendali banjir.
4. Tampungan Mati adalah volume air yang tersimpan di bawah Level Genangan Minimum yang tidak banyak berguna selama pengoperasian waduk.
5. Level Genangan Maksimum. Pada saat terjadinya banjir besar (*high floods*) air dilimpaskan melalui spill way, namun air akan meningkat di atas level genangan normal sampai pada suatu level tertentu yang merupakan level maksimum. Level maksimum yang tercapai air selama banjir besar tersebut dikenal dengan Level Genangan Maksimum.

6. Tampungan Tambahan, merupakan volume air yang tidak dapat dikontrol, volume ini hanya terjadi selama berlangsungnya banjir dan tidak dapat disimpan untuk keperluan selanjutnya.
7. *Bank Storage* adalah sejumlah air yang merembes ke dalam tanggul permeabel waduk selama pengisian waduk, namun akan keluar kembali begitu waduk dikosongkan. Jumlahnya hanya beberapa persen dari volume total waduk bergantung pada formasi geologis batuan wilayah tempat waduk tersebut dibangun.
8. *Valley Storage*, adalah sejumlah air yang tersimpan di dalam saluran sungai, bahkan telah ada sebelum waduk tersebut dibangun.

2.2 Fenomena Aliran Inflow

Keberadaan air sebagai suatu aliran permukaan adalah tidak tetap dan selalu berubah, sehingga pada suatu saat akan melimpah dan saat yang lain akan menyusut. Fenomena tersebut tentunya harus dihadapi sebagai suatu kenyataan dalam perencanaan maupun dalam pengelolaan sumber daya air.

Pengelolaan sumber daya air tersebut dapat berupa bendungan atau waduk yang berfungsi untuk menstabilkan aliran air sehingga dapat menyimpan air pada musim hujan untuk dipergunakan pada musim kemarau (Sudjarwadi, 1989). Namun hal itu tidaklah mudah, karena adanya faktor ketidakseragaman inflow dalam setiap perubahan waktu dan batasan fisik bendungan atau waduk tersebut. Sehingga strategi yang tepat diperlukan dalam pengoperasian waduk agar waduk dapat berfungsi dengan optimal. Strategi pengoperasian waduk diperoleh melalui analisa yang melibatkan tampungan (*storage*) waduk yang bervariasi dan pengaturan distribusi suplai air.

Hal tersebut berkait erat dengan siklus hidrologi pada bumi ini. Siklus hidrologi adalah sirkulasi yang kontinu antara air laut dan air daratan, yang di dalamnya tercakup proses penguapan, presipitasi dan pengaliran keluar.

Secara sederhana prosesnya diuraikan sebagai berikut : air dari permukaan tanah dan laut akan menguap ke atmosfer hingga akhirnya membentuk awan. Kemudian kumpulan uap air di dalam awan akan jatuh kembali ke bumi sebagai hujan dan salju. Sebelum tiba ke permukaan bumi, sebagian air hujan ini akan menguap, namun sebagian lagi tidak langsung jatuh ke bumi. Ada sebagian yang tertahan oleh tumbuh-tumbuhan di mana sebagian akan menguap dan sebagian akan jatuh atau mengalir melalui dahan secara perlahan-lahan ke permukaan bumi.

Sebagian air hujan yang tiba di permukaan tanah akan masuk ke dalam tanah (*infiltrasi*), sebagian akan mengisi lekuk-lekuk permukaan tanah, dan yang lainnya mengalir ke daerah-daerah yang rendah masuk ke sungai-sungai dan akhirnya ke laut. Tidak semua butir air yang mengalir di sungai akan tiba di laut, dalam perjalanannya sebagian akan menguap kembali ke udara. (Linsley, Rey K. 1986).

Sementara itu air yang masuk ke dalam tanah segera keluar mengalir ke sungai-sungai sebagai aliran intra (*interflow*) dan sebagian besar lainnya akan tersimpan sebagai air tanah (*groundwater*) yang akan keluar sedikit demi sedikit ke permukaan tanah di daerah-daerah yang lebih rendah sebagai limpasan air tanah (*groundwater run-off*). Jadi sungai-sungai yang ada menampung air dari limpasan permukaan, aliran intra, dan limpasan air tanah yang keadaannya berubah dari waktu ke waktu.

Fenomena hidrologi yang berubah dari satu keadaan ke keadaan yang lain mengikuti suatu fungsi ruang dan waktu disebut dengan proses hidrologi. Proses hidrologi

yang berdasarkan pada kaitannya dengan suatu fungsi ruang dan waktu ini dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Linsley, Rey K. 1986) :

1. Proses Deterministik

Proses ini terjadi apabila perubahan dari variabel hidrologi memiliki keadaan yang kejadiannya (besaran dan waktu) telah diketahui dengan pasti dan tertentu.

2. Proses Probabilistik

Proses ini terjadi apabila perubahan variabel hidrologi mempunyai berbagai kemungkinan (*probability*) dari suatu nilai atau besaran namun tidak memiliki ketergantungan pada perubahan waktu yang menyertainya.

3. Proses Stokastik

Proses ini terjadi apabila variabel acak yang memiliki nilai atau besaran berubah mengikuti perubahan waktu dan terkait pada hukum-hukum probabilistik. Pada proses ini variabel hidrologi memiliki nilai kemungkinan yang berkait dengan waktu.

Proses hidrologi yang terjadi dalam pembentukan aliran air sungai sebagaimana diuraikan di atas menunjukkan bahwa sifat ketidakpastian besarnya debit air sungai merupakan wujud dari sifat stokastik pada evaporasi, hujan, temperatur udara dan unsur-unsur meteorologis lainnya (Loucks, 1981).

2.2.1 Proses Stokastik

Variabel-variabel acak yang ada dalam sumber daya air merupakan fungsi dari nilai yang berubah seiring dengan perubahan waktu. Variabel acak yang nilainya berubah dari waktu ke waktu tersebut umumnya mengikuti hukum-hukum probabilitas. Variabel ini di alam mengikuti suatu proses yang dikenal dengan *proses stokastik* (Loucks, 1981).

Contoh variabel acak tersebut adalah rekaman data curah hujan atau aliran debit sungai historis yang diperoleh melalui suatu observasi atau penelitian. Suatu observasi atau penelitian ini tidak dapat berdiri sendiri karena nilai variabel yang didapat pada saat ini akan berpengaruh pada nilai variabel pada masa yang akan datang, sehingga diperlukan penelitian dan observasi yang berkelanjutan dalam beberapa periode waktu.

Dari penelitian-penelitian tersebut akhirnya didapat sekumpulan atau rangkaian nilai-nilai yang tersusun menurut urutan-urutan kejadiannya yang dapat dikarakteristikkan oleh sifat-sifat statistik. Urut-urutan data tersebut dikenal dengan istilah runtun waktu (*time series*).

Rangkaian nilai-nilai pada *time series* tersebut yang diwakilkan oleh $x(t_1)$, $x(t_2)$, $x(t_3)$... di mana $t_1 < t_2 < t_3$... merupakan penjelasan tentang salah satu contoh dari konsep dasar proses stokastik (*stochastic processes*).

2.2.2 Proses Markov

Anggapan yang umumnya ada pada model-model sumber daya air stokastik adalah bahwa proses stokastik $X(t)$ merupakan suatu proses Markov (Loucks, 1981). Karena Hukum I Markov (Bogardi, 1988) menyatakan bahwa proses Markov memiliki sifat dimana adanya sifat ketergantungan nilai-nilai pada waktu yang akan datang terhadap nilai-nilai yang ada/diperoleh pada saat ini. Hal ini serupa seperti yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya mengenai proses stokastik.

Maka apabila $t_0 < t_1 < \dots < t_n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) menyatakan titik-titik waktu, kumpulan variabel random $X(t_n)$ adalah proses Markov jika memenuhi sifat berikut ini :

$$P \{X(t_n) = X_n \mid X(t_{n-1}) = X_{n-1}, \dots, X(t_0) = X_0\} \dots\dots\dots (2.1)$$

Untuk seluruh nilai $X(t_0)$, $X(t_1)$, ..., $X(t_n)$

Suatu hal yang istimewa dari proses Markov ini adalah bahwa *state* $X(t)$, dapat merangkum/mengaitkan nilai-nilai yang hanya berupa nilai diskrit saja. Proses pengaitan nilai-nilai diskrit seperti yang diuraikan di atas diistilahkan dengan rantai Markov (*Markov-chain*).

Sehingga dalam perencanaan sumber daya air, proses stokastik yang menerus tersebut sering dilakukan pendekatan dengan rantai Markov, yang memudahkan dalam penyusunan model stokastik menjadi lebih sederhana (Loucks, 1981).

2.3 Analisa Sistem

Suatu pendekatan yang rasional, efisien dan sistematis untuk mencapai suatu keputusan yang terbaik bagi suatu sistem berdasarkan informasi yang ada, dikenal sebagai analisa sistem (Pranoto, 1993; Makrup, 1995 dalam Gunawan, 2002)

Dalam analisa sistem ada berbagai teknik penyelesaian masalah dan pengambilan keputusan diantaranya yang biasa digunakan dalam sumber daya air adalah teknik simulasi dan teknik optimasi (Goulter, 1981). Teknik simulasi adalah suatu metode kuantitatif yang menggambarkan kelakuan dari suatu sistem yang dipergunakan untuk memperkirakan keluaran sistem dari masukan yang telah ditentukan (Buras, 1975). Sedangkan teknik optimasi adalah proses yang sistimatik untuk memperoleh hasil yang terbaik/optimal (Rao, 1978)

Peran analisa sistem dapat dirumuskan sebagai upaya untuk memberikan suatu pendekatan secara kuantitatif dan ilmiah untuk menyediakan dasar-dasar yang rasional dalam pengambilan keputusan, sehingga didapatkan hasil yang optimal pada sistem sumber daya air yang kompleks dari sejumlah variabel pengambilan keputusan (*decision variable*) dan batasannya (*constraints*).

2.4 Teknik Optimasi

Teknik optimasi kerap dimanfaatkan untuk memecahkan permasalahan yang berkaitan dengan sumber daya air karena keterbatasan dan banyaknya faktor kendala yang memungkinkan kurang termanfaatkan sumber daya air tersebut secara baik.

Demikian juga halnya dalam permasalahan pengoperasian waduk, banyak sekali faktor yang mengurangi kinerja waduk sehingga kegunaan dari waduk menjadi tidak maksimal. Disinilah peran dari teknik optimasi yang sangat vital dalam usaha untuk memperoleh hasil yang sebesar-besarnya dari pendayagunaan yang dilakukan. Dari teknik optimasi selanjutnya diwujudkan ke dalam pola pengoperasian waduk, sehingga waduk akan menghasilkan keuntungan yang maksimal seperti yang diharapkan.

Teknik optimasi ini ada beberapa macam, antara lain teknik program linier, program non linear, program dinamik dan simulasi. Diantara berbagai teknik tersebut tidak ada yang berlaku umum, yang dapat digunakan untuk semua keperluan optimasi operasi waduk. Pemilihan suatu optimasi sangat tergantung pada karakteristik waduk yang ditinjau, ketersediaan data, sasaran dan kendala yang dipakai.

Yeh (1985) telah melakukan tinjauan terhadap berbagai teknik optimasi pada waduk baik waduk tunggal maupun multi waduk dan pengelolaan sumber daya air, secara umum dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok yaitu :

1. Program Linier (*linear Programming*)
2. Program Non Linier (*Non linier Programming*)
3. Program Dinamik (*Dynamic Programming*)
4. Model Simulasi

Penjelasan dari masing – masing teknik optimasi beserta kelebihan dan keuntungan yang dimiliki diuraikan sebagai berikut :

1. Program linier (*linear Programming*)

Program linier banyak dipakai dalam optimasi pendayagunaan sumber daya air, baik untuk permasalahan operasi dan pengelolaan yang sederhana sampai permasalahan yang kompleks. Teknik program linier dapat dipakai apabila terdapat hubungan linier antara variabel-variabel yang dioptimasi, baik dalam fungsi tujuan (*objective function*) maupun kendala (*constraint function*).

Apabila permasalahan yang ditinjau bersifat non linier, seperti yang umum dijumpai dalam sumber daya air, maka hubungan antara variabel diubah menjadi bentuk linier atau persamaan-persamaan non linier pada fungsi sasaran dan kendala dipecah menjadi beberapa persamaan linier dan diselesaikan dengan metode iterasi dan aproksimasi (Yeh, 1985).

Persamaan umum dari LP dinyatakan sebagai berikut (Wurbs, 1996, Hiller & Lieberman, 1994, dalam Gunawan, 2002) :

a. Fungsi Tujuan (*objective function*) :

$$\text{Maximize } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

b. Fungsi Kendala (*constraint function*) :

$$A_{11} X_1 + A_{12} X_2 + A_{1n} X_n \quad \geq \text{atau} \leq B_1 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$A_{21} X_1 + A_{22} X_2 + A_{2n} X_n \quad \geq \text{atau} \leq B_2 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$A_{m1} X_1 + A_{m2} X_2 + A_{mn} X_n \quad \geq \text{atau} \leq B_m \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{Syarat non negative : } x_j \geq 0 \text{ untuk } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana	C_j	= Koefisien fungsi tujuan variabel ke-j
	A_{ij}	= Koefisien fungsi kendala ke-i variabel ke-j
	B_m	= Nilai ruas kanan dari persamaan kendala ke-m yang menunjukkan nilai syarat kendala tersebut
	X_j	= Variabel keputusan ke-j
	Z	= Fungsi Tujuan
	i	= 1, 2, ..., m (indeks untuk jumlah variabel kendala)
	j	= 1, 2, ..., n (indeks untuk jumlah variabel keputusan)

Beberapa asumsi yang digunakan pada proses linier yaitu (Pranoto, 1993, dalam Gunawan, 2002):

1. *Proportionality* yaitu bahwa naik turunnya nilai Z dan penggunaan sumber daya yang ada akan berubah secara sebanding (*proportional*) dengan perubahan tingkat aktivitas.
2. *Linierity* yaitu fungsi tujuan dari persamaan kendala harus dapat dinyatakan sebagai suatu fungsi linier.
3. *Divisibility* yaitu keluaran yang dihasilkan setiap aktivitas dapat berupa bilangan pecahan demikian pula dengan nilai Z .
4. *Deterministik* yaitu semua parameter dalam model program linear tetap dan diketahui secara pasti.
5. *Additivity* yaitu nilai dari semua variabel keputusan mempunyai nilai yang sama dengan jumlah fungsi masing-masing individu variabel.

Keunggulan program linier adalah kemudahannya untuk penyelesaian permasalahan optimasi berdimensi besar, sedangkan kelemahannya adalah kemungkinan terjadinya kesalahan yang menimbulkan kekeliruan dari hasil program ini sangat besar

karena pendekatan yang dilakukan dalam melenierisasi fenomena non linear pada beberapa variabel tidak tepat (Makrup, 1995; Goulter, 1981). Oleh karena itu, keandalan program linier tergantung pada tingkat pendekatan dalam linierisasi hubungan antara variabel.

2. Program Non linear (*Non linier Programming*)

Teknik program non linear tidak banyak dipakai dalam permasalahan pendayagunaan sumber daya air karena berbagai kelemahan yang dimilikinya. Teknik optimasi ini membutuhkan proses yang kompleks, sehingga penyelesaian menjadi lambat dan memerlukan memori komputer yang besar. Selain itu, program non linier membutuhkan penjabaran persamaan-persamaan matematis yang lebih rumit dibandingkan dengan program linier, sifat stokastik sistem pun tidak dapat dirangkum dengan mudah dalam program non linier (Yeh, 1985).

Kelebihan yang dimilikinya adalah dalam penyelesaian masalah persamaan non linier bisa dilakukan tanpa harus melinierisasi persamaan tersebut (Gunawan, 2002).

3. Program Dinamik (*Dynamic Programming*)

Program dinamik yang dikembangkan pertama kali oleh Bellman pada tahun 1957 (Bogardi, 1988; Yeh, 1985) adalah suatu prosedur untuk mengoptimasikan suatu proses keputusan berangkai (*multi stage*) dalam penyelesaian suatu masalah karena program ini memecahkan satu permasalahan menjadi beberapa tahapan pemecahan masalah (*sub problem*).

Program dinamik ini mengoptimasikan suatu proses pengambilan keputusan berangkai dengan memberikan suatu ketetapan rangkaian keputusan yang saling berkaitan satu dengan yang lain, yang merupakan fungsi tempat dan waktu.

Hall, W. A. dan Dracup, J. A. (1970) menyatakan bahwa dengan dibandingkan dengan teknik optimasi lainnya, program dinamik memiliki sejumlah keuntungan dalam pemakaiannya untuk optimasi pendayagunaan sumber daya air

Karena teknik ini dapat merangkum sasaran dan kendala yang bersifat non linier, dapat memecahkan suatu permasalahan yang sulit ke dalam suatu kumpulan sub permasalahan. Sifat Stokastik, suatu sifat yang terkait dalam setiap permasalahan sumber daya air, dapat pula tercakup dalam teknik program ini karena kelebihanannya ini maka DP telah digunakan secara lebih luas pada proses optimasi sumber daya air (Buras, 1966).

Berdasarkan kelebihan dan kelemahan yang disebutkan di atas, maka pada penelitian ini digunakan Program Dinamik tipe Stokastik dengan pertimbangan sebagai berikut :

1. Program ini dapat memecahkan permasalahan stokastik pada waduk.
2. Perkembangan bahasa pemrograman yang cukup pesat sehingga dapat memudahkan perumusan dan penyelesaian program ini, salah satu bahasa komputer yang memiliki visualisasi yang bagus berbasis *windows* antara lain adalah *Borland Delphi* yang saat ini telah sampai versi 6 (*Borland Delphi 6*).
3. Perkembangan *Hardware* komputer dengan memori yang besar dan *processor* yang cepat dapat membantu proses *looping* yang panjang dan kompleks dari program yang dibuat.
4. Simulasi

Simulasi dalam permasalahan pendayagunaan sumber daya air adalah suatu teknik permodelan yang dipakai untuk menirukan dan memindahkan perilaku suatu sistem ke

dalam suatu model. Model simulasi menunjukkan apa yang terjadi di dalam sistem dengan diberikannya masukan-masukan tertentu.

Dengan demikian pola pengelolaan sistem dapat diterapkan dengan mempelajari reaksi terhadap berbagai skenario pengelolaan sistem tanpa perlu memiliki sistem itu sebenarnya (Yeh, 1985).

Metode Simulasi ada beberapa tipe (Hall, 1975) :

1. Simulasi dalam bentuk fisik, misalnya model skala fisik hidroulik.
2. Simulasi dalam bentuk analog, misalnya model simulasi yang diwakilkan dengan bentuk rangkaian listrik.
3. Simulasi dalam bentuk digital, yaitu dengan menggunakan persamaan matematis misalnya hukum keseimbangan air untuk simulasi waduk.

2.5 Program Dinamik Dalam Optimasi Waduk

Bogardi (1988) menyebutkan bahwa Hall dan Buras (1968) merupakan orang pertama yang mengajukan pemakaian program dinamik untuk pengoptimasian waduk. Pada perkembangannya saat ini teknik program dinamik telah berkembang menjadi beberapa jenis yang dapat dikelompokkan ke dalam dua golongan yaitu program dinamik deterministik dan program dinamik stokastik.

Penggolongan ini bergantung terutama dari karakteristik debit inflow sungai yang dipergunakan dalam optimasi tersebut. Pada model deterministik, debit inflow pada masing-masing interval waktu telah ditentukan, sedangkan pada model stokastik, debit inflow diperoleh sebagai suatu proses stokastik dari data-data yang ada dan cara pendekatannya adalah sebagai suatu proses Markov yang ditampilkan dengan sebuah matrik probabilitas transisi.

Algoritma perhitungan Program Dinamik adalah serupa baik deterministik maupun stokastik, hanya saja pada program dinamik deterministik, fungsi tujuannya (*objective function*) telah ditentukan sebagai tujuan tertentu yang didasarkan pada nilai inflow yang diketahui. Berbeda dengan program dinamik stokastik dimana nilai yang diharapkan dari suatu fungsi tujuan (*objective function*) yang mencerminkan suatu rentang debit inflow yang mungkin bersama dengan kelompok probabilitas yang ditentukan.

Secara sederhana disimpulkan bahwa pada program dinamik deterministik menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari sebuah variabel acak yang diskrit sedangkan pada program dinamik stokastik menggunakan probabilitas inflow bersyarat yang diperoleh dari matrik probabilitas transisi dan nilai yang diharapkan yang diperoleh dari fungsi tujuan yang berulang perhitungannya (*recursive objective function*).

Aplikasi program dinamik dalam pengoperasian waduk dipaparkan oleh Yakowitz (1982) secara lebih luas, antara lain Young (1967), Hall, dkk. (1968) dengan pokok persoalannya adalah pengoperasian pada waduk tunggal dan Trott dan Yeh (1973), becker dan Yeh (1974) dengan pokok persoalannya adalah pengoperasian pada multi waduk.

2.5.1 Prinsip Program Dinamik

Sebelum pembahasan tentang teori dan prosedur teknik optimasi program dinamik stokastik diuraikan, terlebih dahulu dibahas prinsip teknik optimasi program dinamik sebagai akar program dinamik stokastik.

Program dinamik adalah suatu teknik optimasi yang dapat dipakai untuk pemecahan atau penentuan alternatif keputusan yang harus diambil dari suatu permasalahan, yang permasalahan tersebut diubah menjadi sejumlah permasalahan yang paling terkait.

Prinsip program dinamik adalah penguraian dan penyusunan suatu permasalahan besar menjadi suatu rangkaian permasalahan yang lebih kecil dan saling terkait satu dengan yang lain. Dengan prinsip tersebut, suatu masalah diurai menjadi rangkaian n permasalahan yang masing-masing memiliki suatu penyelesaian (Bogardi, 1988).

Garis besar prinsip Program Dinamik ini adalah :

1. Setiap persoalan dipecah menjadi persoalan yang lebih kecil atau *sub problem* yang disebut *stage*. Kemudian setiap *stage* dioptimalkan menurut alternatifnya masing-masing, sehingga tidak perlu menghitung semua kombinasi pada *stage* tertentu.
2. Karena optimasi dikerjakan pada setiap *stage* (*sub problem*) maka semua kombinasi yang tidak optimal dengan segera dapat dibuang.
3. Setiap *stage* dikaitkan dengan lainnya dengan cara khusus, sehingga tidak mungkin mengoptimisasi kombinasi-kombinasi yang tidak layak.

Dalam perumusan program dinamik ketiga hal yang tersebut di atas dinyatakan dengan tiga elemen pokok, yaitu (1) *stage*, (2) variabel keputusan (*decision variable*) pada setiap *stage* dan fungsi tujuan (*objective function*), dan (3) *state* dari pada sistem yang menunjukkan kaitan dari satu *stage* dengan *stage* lainnya.

2.5.2 Program Dinamik Stokastik

Pada Program Dinamik Stokastik ini, ada beberapa peristilahan dan variabel yang menunjang untuk mencapai target yang diharapkan, antara lain sebagai berikut :

1. Fungsi Sasaran (*Objective Function*)
2. Probabilitas Transisi Inflow
3. Persamaan Pelepasan di Waduk (*Reservoir Release*)
4. Kinerja Sistem (*System Performance*)

5. Persamaan Rekursif
6. Kriteria Konvergensi

Penjelasan dari beberapa point di atas adalah sebagai berikut:

1) Fungsi Sasaran (*Objective Function*)

Masukan utama dalam operasi waduk adalah inflow yang merupakan proses alam yang tidak pernah deterministik, dan sifat ketidakpastian selalu terkait dalam inflow. Sifat ketidakpastian atau stokastik ini diperhitungkan dalam optimasi dengan memasukkan sebaran probabilitas inflow pada setiap tahap optimasi.

Dengan memperhitungkan sifat stokastik inflow tersebut, maka sasaran optimasi operasi waduk dapat ditentukan, misalnya memaksimalkan produksi listrik tahunan yang diharapkan. Kata “diharapkan” dipakai untuk mencerminkan adanya harapan terhadap sesuatu yang tidak pasti, hal inilah yang merupakan ciri teknik program dinamik stokastik. Secara sistematis, sasaran tersebut dapat dinyatakan dalam fungsi sasaran (*objective function*) sebagai berikut (Shrestha, 1987) :

$$OF \equiv \text{maksimumkan (TEEG)} = \text{maksimumkan } E \left[\sum_{t=1}^T (TEG_t) \right] \dots\dots\dots (2.7)$$

OF : *Objective Function* (fungsi tujuan)

TEEG : Produksi Listrik tahunan yang diharapkan

TEG_t : Produksi listrik selama bulan t

E : menyatakan nilai harapan (*expectation*)

2) Probabilitas Transisi Inflow

Probabilitas transisi ini dirumuskan sebagai berikut :

$$p_{ij} = \Pr\{Q_{y+1} = q_i | Q_y = q_j\} \dots\dots\dots (2.8)$$

Probabilitas bahwa Q_{y+1} (debit di tahun sekarang) akan sama dengan q_j jika Q_y (debit di tahun sebelumnya) sama dengan q_i . Probabilitas transisi ini akan memenuhi kondisi : $\sum_{j=1}^n P'_{ij} = 1$ dimana P'_{ij} adalah probabilitas kejadian bahwa Q^{t+1} akan berada di kelas j jika Q^t tercatat di kelas i .

Probabilitas transisi ini dapat disajikan dalam bentuk matrik, probabilitas transisi dari *state* q_i ke *state* q_j adalah sebagai berikut (misal variabel kontinu debit sungai dibagi ke dalam 3 nilai diskrit) :

Tabel 2.1 Matrik Probabilitas Transisi Debit Inflow pada Waduk.

Kelas inflow pada Periode t	Kelas inflow pada Periode t+1			Jumlah
	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	
Kelas 1	p_{11}	p_{12}	p_{13}	1
Kelas 2	p_{21}	p_{22}	p_{23}	1
Kelas 3	p_{31}	p_{32}	p_{33}	1

Dalam permasalahan operasi waduk, dianggap proses yang terjadi berulang dan selalu sama dalam setiap siklus operasi. Apabila satu tahun, yang terdiri dari 12 tahap (12 bulan) merupakan satu siklus operasi T , maka nilai probabilitas transisi inflow pada suatu bulan adalah sama dengan nilai probabilitas transisi inflow pada bulan yang sama pada tahun berikutnya. Jadi, persamaan dalam satu siklus tersebut adalah :

$$P'_{ij} = P_{ij}^{t+T} \dots\dots\dots (2.9)$$

3) Persamaan Pelepasan di Waduk (*Reservoir Release*)

Untuk menangani permasalahan program dinamik stokastik, membutuhkan pengenalan persamaan mengenai pelepasan waduk, yang didefinisikan sebagai $R_{k,i,l,t}$ yang bergantung pada tingkat tampungan pada periode yang sedang berlangsung $S_{k,t}$, Inflow pada periode yang sedang berlangsung $Q_{i,t}$ dan tingkat tampungan waduk pada periode akan datang $S_{l,t+1}$. Persamaan ini dapat dihitung melalui persamaan kekekalan sebagai berikut :

$$R_{k,i,l,t} = S_{k,t} + Q_{i,t} - S_{l,t+1} - E_{k,l,t} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana $E_{k,l,t}$ adalah kehilangan air yang disebabkan oleh evaporasi dan rembesan (*seepage*) pada waduk.

4) Kinerja Sistem (*System Performance*)

Pengoptimalan dari pelepasan bergantung pada kinerja sistem untuk mendapatkan target pelepasan dan target tampungan. Persamaan tersebut seperti berikut :

$$B_{k,i,l,t} = (R_{k,i,l,t} - TR_t)^2 + (S_{k,t} - TS_t)^2 \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

$B_{k,i,l,t}$ = Kinerja sistem

TR_t = Target pelepasan bulanan

TS_t = Target tampungan bulanan

Persamaan ini akan bernilai nol jika pelepasan sama dengan nilai targetnya. Jika terdapat deviasi dari masing-masing nilai target, maka akan mendapatkan nilai sebagai fungsi dari penyimpangan (deviasi) yang terjadi. Persamaan ini tidak tetap dalam artian dapat berubah apakah menggunakan deviasi release atau deviasi tampungan saja, bergantung pada bagian mana penekanannya. (Loucks, 1981).

→ John Andri Nugraha
Rend =

Tesis

Apizal - Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro

UPT-PUSTAK-UNDIP

5) Persamaan Rekursif

Persamaan rekursif adalah persamaan yang menyatakan hubungan antara nilai variabel status sebagai hasil optimasi pada setiap tahap dengan nilai masukan variabel status tersebut dan variabel keputusan yang diambil pada tahap yang ditinjau. Hal ini disebabkan karena setiap masukan pada setiap tahap merupakan sebaran probabilitas. Bentuk persamaan rekursif adalah sebagai berikut :

$$F_t(k, i) = \underset{l}{\text{Minimum}} [B_{klt} + \sum_j P_{ij}^{t+1} F_{t+1}^*(l, j)] \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

$F_t(k, i)$ adalah nilai fungsi objektif jika volume waduk di kelas k , volume inflow di kelas i , pada waktu ke t .

$B_{k,i,l,t}$ adalah nilai fungsi objektif jangka pendek (*immediate return*) jika volume waduk bulan t ada di kelas k , inflow ke waduk kelas i , dan volume waduk adalah l .

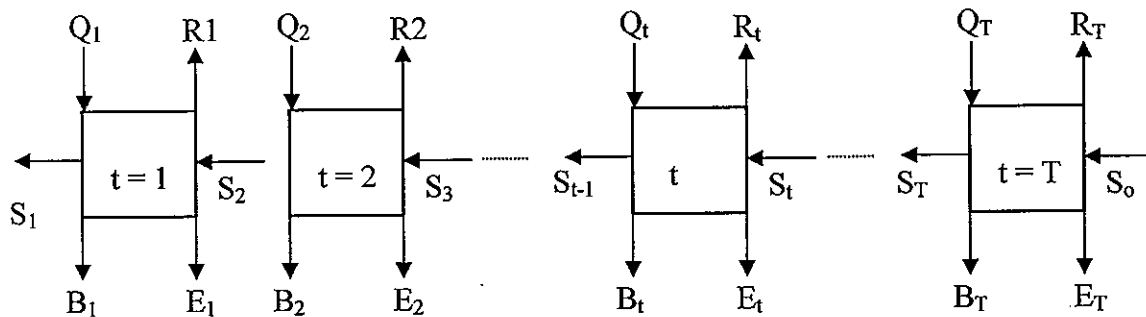
P_{ij}^{t+1} adalah matrik probabilitas transisi inflow dari periode/bulan i ke periode/bulan j .

$F_{t+1}^*(l, j)$ adalah nilai fungsi objektif jangka panjang (*long term periode*) yang diperoleh pada periode waktu $t+1$ jika volume waduk pada awal periode waktu $t+1$ berada di kelas l dan inflow berada di kelas j .

Mengingat nilai $F_{t+1}^*(l, j)$ pada persamaan (2.12) diatas, tahap T telah diketahui sebagai kondisi awal, maka urutan optimasi dilakukan dari tahap T dan berjalan mundur sampai ke tahap pertama. Prosedur optimasi ini disebut *Backward Moving Algorithm*.

6) Kriteria Konvergensi

Proses optimasi dilakukan pada setiap tahap selama satu siklus operasi. Pada awal optimasi, nilai hasil pada tahap akhir (bulan ke $-T$), nilai $f_T(l, j)$ diberi nilai awal nol. Hitungan berjalan mundur sampai tahap pertama dan kemudian diulang kembali (iterasi) sampai hasil optimasi menunjukkan hasil yang stabil.



Gambar 2.1 Diagram Urutan Pentahapan Optimasi.

Begitu persamaan rekursif ini terpecahkan untuk setiap periode pada tahun-tahun berikutnya, kebijakan $l(k, i, t)$ yang ditentukan dalam setiap periode t tertentu akan dengan relatif cepat, berulang kembali pada tiap tahun berikutnya. Pada saat keadaan ini tercapai dan saat performansi tahunan harapan (*expected*) adalah konstan untuk semua *state* k, i dan untuk seluruh periode satu tahunan t , maka kebijakan pengoperasian telah mencapai kondisi *steady-state*.

Kondisi *steady-state* ini tercapai jika dan hanya jika pola operasinya tidak berubah dari tahun ke tahun. Karena kebijakan pengoperasian yang *steady-state* ini tercapai, maka pola operasi yang dihasilkan merupakan kebijakan pengoperasian yang *steady* untuk jangka panjang. Kebijakan pengoperasian waduk akan merupakan volume waduk pada

akhir bulan ke t (pada awal bulan ke $t+1$) yang optimum sebagai fungsi dari kombinasi debit masukan (*inflow*) bulan $t-1$ dan volume tampungan awal (*Storage*) pada bulan t . Sehingga dapat ditentukan besarnya pelepasan (*release*) air pada setiap periode.

Tabel 2.2 Matriks Kebijakan Operasi Waduk

State k (Kelas Tampungan waduk awal bulan t)	State i (kelas inflow di bulan t)		
	1	2	3
0	R_{10l}^{*t}	R_{20l}^{*t}	R_{30l}^{*t}
1	R_{11l}^{*t}	R_{21l}^{*t}	R_{31l}^{*t}
2	R_{12l}^{*t}	R_{22l}^{*t}	R_{32l}^{*t}

Keterangan $l^* =$ indeks volume tampungan akhir yang optimal untuk k dan i yang memungkinkan

2.6 Listrik Tenaga Air

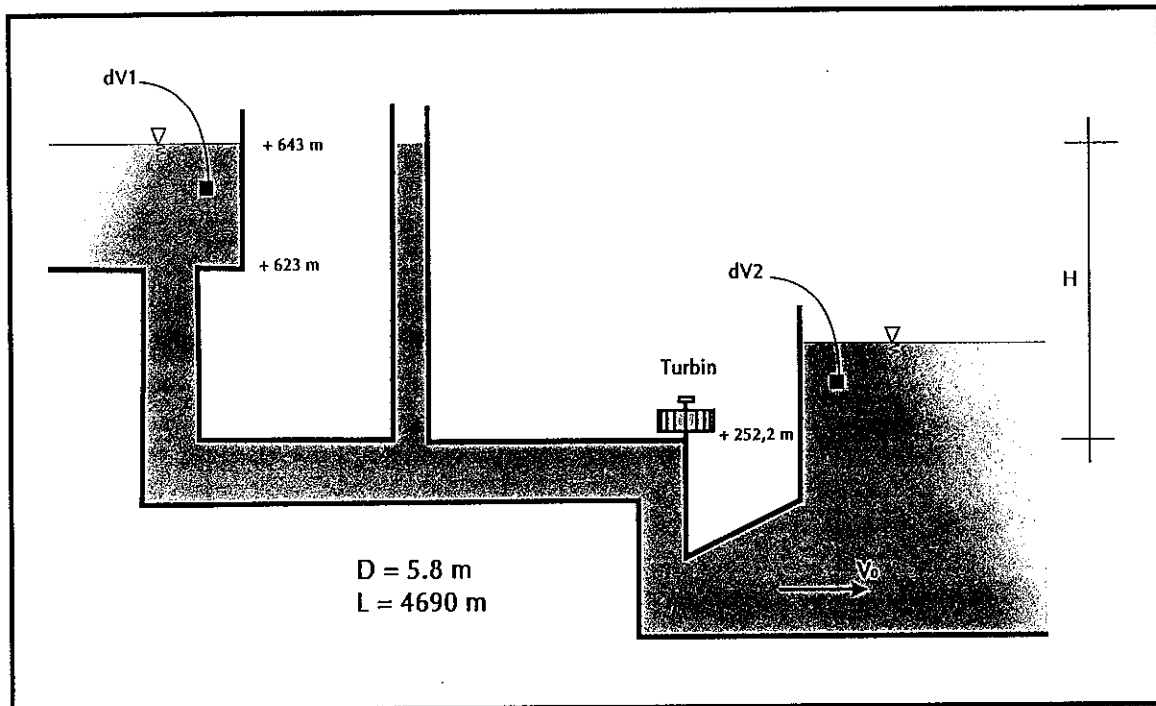
Tenaga listrik yang dihasilkan oleh turbin tergantung dari besarnya debit yang masuk, tinggi jatuh, serta efisiensi turbin dan generator yang digunakan. Besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh suatu debit dari tinggi jatuh tertentu dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \eta g Q h \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Rumus penurunan besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh suatu debit dengan tinggi jatuh tertentu didekati dengan prinsip kerja energi. Jika elemen volume air dinyatakan dengan (dv) bergerak dari posisi 1 yang berada sedikit di bawah ketinggian daerah hulu ke posisi 2 yang terletak di permukaan daerah hilir di pintu keluar aliran terowongan seperti pada Gambar 2.2 maka kerja yang dilakukan (dw) mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$\text{Energi atau kerja} = \text{Gaya} \times \text{jarak} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\text{atau } dw = \rho g dv h$$



Gambar 2.2

Diagram Untuk Menentukan Energi yang Dihasilkan Turbin

Mengingat bahwa elemen volume air bergerak dalam beberapa unit waktu yang berbeda (dt), maka perbedaan debit air (dQ) dapat dinyatakan :

$$dQ = \frac{dv}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Daya yang bekerja pada unit *hydropower* dinyatakan sebagai energi persatuan waktu yaitu:

$$dp = \frac{dw}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Substitusi pers. (2.14) ke dalam pers. (2.16) diperoleh :

$$dp = \frac{\rho g dv h}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Juga dengan substiusi pers. (2.15) ke dalam pers. (2.17) diperoleh :

$$dp = \frac{\rho g dQ dt h}{dt} \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan integrasi kedua sisi, (g dan h sebagai besaran tetap)

$$\int dp = \rho g h \int dQ$$

Kapasitas daya yang ada pada pembangkit listrik dengan satuan kilowatt adalah

$$P = \frac{\rho g Q h}{1000} \text{ yang merupakan persamaan untuk daya terpasang secara teoritis.}$$

Kapasitas daya yang sebenarnya, dikurangi dengan kehilangan energi di turbin dalam mengubah energi potensial dan energi mekanis. Oleh karena itu efisiensi (η) harus dimasukkan ke dalam persamaan daya. Rapat massa untuk air diambil 1000 kg/m^3 sehingga persamaan untuk daya turbin dengan adanya efisiensi dinyatakan sebagai berikut:

$$P = \eta \rho g Q h \text{ atau } P_{(t)} = 9,8 \rho Q_{(t)} h_{(t)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

P = Tenaga yang dihasilkan (KW)

η = Efisiensi turbin dan generator

Q = Debit yang digunakan (m^3/det)

h = Tinggi jatuh rata-rata yang merupakan fungsi volume.

2.7 Kinerja Pengoperasian Waduk

Kinerja Pengoperasian Waduk merupakan indikator waduk dalam pengoperasiannya untuk memenuhi kebutuhan. Beberapa indikator untuk menilai besarnya

performance operasi waduk dapat meliputi keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*) dan kerawanan (*vulnerability*) (Suharyanto, 1997).

2.7.1 Keandalan (*Reliability*)

Keandalan merupakan indikator seberapa sering waduk untuk memenuhi kebutuhan yang ditargetkan selama masa pengoperasiannya. Untuk pengoperasian waduk paling tidak ada dua macam definisi keandalan yaitu : (Mc Mahon dan Russel, 1978 dalam Suharyanto, 1997)

1. Prosentase keadaan dimana waduk mampu memenuhi kebutuhannya. Seringkali pada definisi keandalan ini dapat dikaitkan dengan kegagalan. Dalam hal ini, waduk dianggap gagal jika waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya secara total.
2. Rerata persentase pelepasan waduk dibanding dengan kebutuhannya. Dalam definisi ini, meskipun suplesi waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya, waduk keseluruhan, tidak dianggap gagal total. Tetapi dianggap waduk hanya dapat mensuplai sebagian dari kebutuhannya.

Secara matematis, definisi di atas dapat dituliskan dengan variabel " Z_t " yang nilainya ditentukan sesuai dengan dua definisi di atas dan disajikan dalam persamaan berikut.

$$Z_t^1 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, 0 \text{ untuk } R_t \leq D_t \dots \dots \dots (2.20)$$

$$Z_t^2 = 1 \text{ untuk } R_t \geq D_t, R_t / D_t \text{ untuk } R_t \leq D_t \dots \dots \dots (2.21)$$

Dalam jangka panjang, nilai keandalan sistem untuk definisi keandalan yang pertama dapat ditulis sebagai berikut :

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t^1 \dots\dots\dots (2.22)$$

di mana :

n = Jangka waktu pengoperasian

R_t = Release pada waktu ke- t

D_t = Demand pada waktu ke- t

α_1 = Keandalan waduk, gagal total jika kebutuhan tidak terpenuhi

$\sum_{t=1}^n Z_t^2$ = Jumlah total waktu waduk mampu memenuhi kebutuhan ($R_t \geq D_t$) untuk definisi keandalan ke-2.

$\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^2)$ = Jumlah total waktu waduk tidak mampu memenuhi kebutuhan ($R_t < D_t$) untuk definisi keandalan ke-2.

Dalam studi ini dipergunakan definisi keandalan yang pertama. Waduk dianggap gagal jika tidak dapat mensuplai kebutuhan secara total.

Kondisi tersebut dipergunakan untuk mengantisipasi pemenuhan kebutuhan energi listrik, karena jika pemenuhan kebutuhan energi listrik kurang dari yang ditargetkan maka energi listrik yang dihasilkan oleh optimasi tidak dijamin untuk dapat terpenuhi. Selain itu simulasi mempunyai nilai keandalan yang lebih kecil dari kondisi yang sebenarnya. Sehingga kondisi keandalan pertama diharapkan memberi lebih banyak nilai keamanan terhadap ketersediaan air.

2.7.2 Kelentingan (*Resiliency*)

Indikator ini untuk mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil. Dengan mempergunakan definisi kegagalan pertama, perhitungan masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan dengan variabel “ W_t ” sebagai berikut :

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } R_{t-1} \leq D_{t-1} \text{ dan } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases} \dots\dots\dots (2.23)$$

Dalam jangka panjang, nilai rerata dari “ W_t ” akan menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \dots\dots\dots (2.24)$$

dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekwensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan.

Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinu merupakan jumlah total waktu rerata waduk mengalami gagal dibagi dengan frekwensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat dituliskan berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t} \dots\dots\dots (2.25)$$

dimana :

T_{gagal} = jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinu

Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho} \dots\dots\dots (2.26)$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar. Oleh karenanya indikator kelentingan didefinisikan sebagai γ_1 berikut :

$$\gamma_1 = \frac{1}{T_{\text{gagal}}} = \frac{\rho}{1 - \alpha_1} \dots\dots\dots (2.27)$$

dimana :

γ_1 = Kinerja kelentingan

2.7.3 Kerawanan (*Vulnerability*)

Kerawanan adalah besaran dari kegagalan yang didapat dari perbedaan antara kapasitas waduk dan jumlah air yang dibutuhkan, dibagi dengan jumlah air yang dibutuhkan (Qomariah, 1992).

Dalam hal ini jika terjadi kegagalan maka dapat diukur seberapa besar suatu kegagalan yang terjadi. Dalam studi ini kerawanan didefinisikan sebagai nilai kekurangan (DEF_t) air pelepasan dari kebutuhannya, nilai DEF_t didefinisikan sebagai berikut :

$$DEF_t = \begin{cases} D_t - R_t & \text{jika } R_t \leq D_t \\ 0 & \text{jika } R_t \geq D_t \end{cases} \dots\dots\dots (2.28)$$

Oleh karenanya kinerja kerawanan tersebut dapat dirumuskan dengan berbagai penafsiran sebagai berikut (Suharyanto, 1997).

1. Nilai rerata "*deficit ratio*"

$$v_1 = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{DEF_t}{D_t} \right)}{\sum_{t=1}^n W_t} \dots\dots\dots (2.29)$$

2. Nilai maksimum "*deficit ratio*"

$$v_2 = \max_t \left\{ \frac{DEF_t}{D_t} \right\} \dots\dots\dots (2.30)$$

3. Nilai maksimum "*deficit*"

$$v_3 = \max_t \{ DEF_t \} \dots\dots\dots (2.31)$$

BAB III

METODOLOGI

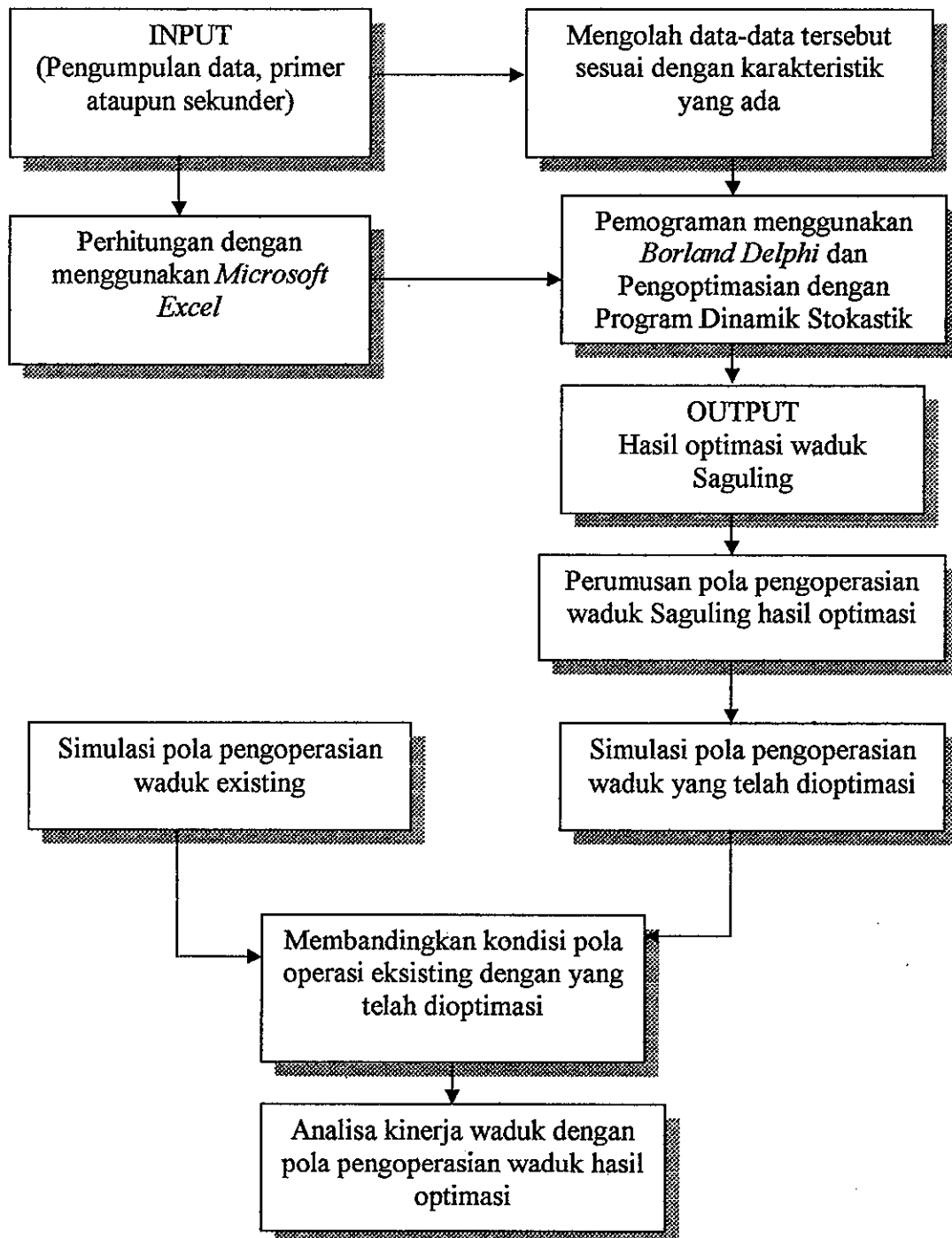
3.1 Desain Penelitian

Agar diperoleh hasil yang maksimal dalam pengoptimasian waduk Saguling yang menggunakan program dinamik stokastik ini maka diperlukan rancangan penelitian yang terarah, dalam hal ini dilakukan beberapa tahapan pekerjaan sebagai berikut :

1. Melakukan pengumpulan data-data yang berpengaruh dan terkait pada pengoptimasian waduk termasuk data-data penunjang seperti pola operasi eksisting dalam beberapa tahun terakhir.
2. Mengolah data-data yang telah dikumpulkan tersebut sesuai dengan karakteristik yang ada seperti data debit inflow, tampungan waduk, evaporasi dan lain sebagainya.
3. Melakukan perhitungan manual program dinamik stokastik dengan menggunakan *software Spreadsheet Microsoft Excel* sebagai salah satu cara untuk mengkonfirmasi langkah-langkah dan tahapan-tahapan yang dilakukan telah sesuai dengan prosedur program optimasi tersebut.
4. Membuat dan menyusun program dinamik stokastik tersebut dalam bahasa pemrograman, dalam hal ini menggunakan program *Borland Delphi*.
5. Merumuskan pola pengoperasian waduk yang didasarkan pada hasil pengoptimasian.
6. Melakukan simulasi terhadap pola pengoperasian waduk existing dan terhadap pola pengoperasian waduk yang telah dioptimasi.

7. Membandingkan hasil optimasi dengan kondisi eksisting dan menganalisa kinerja dari pola pengoperasiannya.

Tahapan desain penelitian di atas diuraikan dalam Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1. Bagan Desain Penelitian

3.2 Data

Studi ini membutuhkan data yang berupa data sekunder yaitu data kuantitatif yang diperoleh dari berbagai instansi sebagai berikut :

1. Data waduk meliputi kapasitas tampungan, elevasi, volume, luas DAS dan lain-lain.
2. Data debit inflow meliputi inflow bulanan selama 74 tahun.
3. Data PLTA meliputi elevasi muka air untuk pengoperasian, kapasitas pipa pesat, daya terpasang dan target energi listrik per tahun.
4. Data waduk eksisting meliputi debit pelepasan air waduk Saguling, *rule curve* pengoperasian waduk Saguling tersebut dan lain sebagainya.

3.3 Penyusunan Model Program Dinamik Stokastik

Model optimasi program dinamik stokastik disusun dalam beberapa tahapan, yang masing-masing tahapan atau komponen memiliki keterkaitan yang sangat erat satu dengan yang lain.

Namun sebelum dipaparkan tahapan-tahapan yang dimaksud perlu diketahui beberapa peristilahan yang penting dan berkait erat, yaitu :

1. Tampungan Waduk (*storage*)
2. Tahap dan Status (*stage and state*)
3. Fungsi Tujuan (*objective function*)
4. Variabel Kendala (*constraint*)
5. Persamaan Transformasi Status (*state transformation equation*)

Penjelasan dari istilah-istilah diatas adalah sebagai berikut :

1. Tampunguan Waduk (*storage*)

Volume tampungan waduk (*storage*) pada program dinamik stokastik dibedakan menjadi 2 yaitu tampungan waduk mula-mula (*initial storage*) dan tampungan akhir (*final storage*). Kedua istilah tersebut akan kerap dipakai pada teknik optimasi ini.

Volume tampungan ini baik volume tampungan mula-mula dan tampungan akhir merupakan pembagian dari volume tampungan aktif dalam beberapa rentang kelas yang diistilahkan dengan diskritisasi. Semakin banyak kelas diskritisasi tampungan waduk ini maka akan memperlama proses perhitungan. Pada masing-masing kelas tampungan akan terdapat nilai tampungan yang mewakili atau diistilahkan dengan volume tampungan representatif.

Penjelasan bagaimana proses diskritisasi volume tampungan waduk ini dilakukan akan dijelaskan dalam sub bab setelah ini.

2. Tahap dan Status (*stage and state*)

Seperti yang telah dijelaskan pada tinjauan pustaka bahwa prinsip dasar dari program dinamik stokastik adalah membagi suatu permasalahan menjadi beberapa permasalahan yang kecil (*sub problem*) maka dalam hal optimasi operasi waduk dapat diuraikan dalam beberapa tahapan pelaksanaan (*stage*). Tahapan atau *stage* ini dapat berupa hitungan bulanan, musim atau sebagainya.

Pada pengoperasian waduk umumnya terdiri dari 12 tahapan (*stage*) yang mencerminkan jumlah bulan dalam 1 tahun. Sehingga waktu satu bulan merupakan satu satuan variabel tahapan (*stage variable*) dan waktu 12 bulan atau 12 tahap tersebut merupakan satu siklus operasi (T).

Status (*state variabel*) sistem ditunjukkan dengan dua variabel, yaitu inflow dan tampungan yang dinyatakan dengan kelas inflow dan kelas tampungan.

3. Fungsi Tujuan (*objective function*)

Sasaran optimasi adalah memaksimalkan hasil atau unjuk kerja yang diharapkan dari sistem secara keseluruhan. Hasil sistem dalam hal ini adalah produksi listrik dari semua PLTA didalam sistem yang ditinjau. Seperti yang dijelaskan pada bab tinjauan pustaka bahwa perbedaan antara program dinamik deterministik dan program dinamik stokastik antara lain bahwa program dinamik deterministik menggunakan nilai harapan (*expected value*) dari sebuah variabel acak yang diskrit sedangkan pada program dinamik stokastik menggunakan probabilitas inflow bersyarat yang diperoleh dari matrik probabilitas transisi dan nilai yang diharapkan yang diperoleh dari fungsi tujuan yang berulang perhitungannya (*recursive objective function*), maka dalam hal ini formula yang dipergunakan adalah persamaan rekursi.

4. Variabel Kendala (*constraint*)

Kendala (*constraint*) berlaku untuk tampungan waduk (*storage*). Pada setiap tahap, volume tampungan waduk dibatasi oleh volume maksimum operasi dan volume minimum operasi.

$$S_{min} \leq S \leq S_{max} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Selain itu terdapat kendala pada jumlah air yang dilepas dan waduk. Jumlah air yang dikeluarkan (R), harus berada diantara debit minimum turbin (R_{min}), dan debit maksimum turbin, (R_{max}).

$$R_{min} \leq R \leq R_{max} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

5. Persamaan Transformasi Status (*state transformation equation*)

Tampungan suatu waduk pada tahap tertentu memiliki hubungan dengan tampungan pada tahap berikutnya, keterkaitan antar tampungan tersebut dihubungkan

dengan suatu persamaan transformasi status (*state transformation equation*) yang didasarkan pada asas Hukum Kekekalan sebagai berikut :

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - E_t - R_t - S_{\text{pillt}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana:

S_{t+1} : Tampungan waduk pada awal bulan $t+1$

S_t : Tampungan pada awal bulan t

Q_t : Inflow kedalam waduk selama bulan t

E_t : Evaporasi dari waduk selama bulan t

R_t : Pelepasan dari waduk selama bulan t

S_{pillt} : Pelimpahan dari waduk selama bulan t

Demikian beberapa peristilahan yang akan banyak ditemui pada penyusunan model program dinamik stokastik. Selanjutnya tahapan atau komponen dalam model program dinamik stokastik sebagai berikut :

1. Diskritisasi Debit Inflow
2. Perhitungan Matrik Probabilitas Transisi Inflow (lihat Gambar 3.2)
3. Diskritisasi Tampungan Waduk
4. Perhitungan Kinerja Sistem ($B_{k,i,l,t}$)
5. Perhitungan Persamaan Program Dinamik Stokastik
6. Penentuan Akhir Kebijakan Pengoperasian Waduk Hasil Optimasi

Selengkapnya penjelasan dari beberapa point di atas, diuraikan sebagai berikut :

3.3.1 Diskritisasi Debit Masukan (*Inflow*)

Debit aliran sungai (*inflow*) pada masa datang tidak dapat diperkirakan secara pasti. Namun, berdasarkan debit historis yang ada, probabilitas kejadian debit tertentu pada masa

datang dapat diperkirakan dengan menggunakan proses Markov seperti dijelaskan pada bab tinjauan pustaka. Sehingga dalam program dinamik stokastik ini agar proses inflow yang terjadi di alam dapat diakomodir maka digunakan hukum Markov. Dalam hukum Markov data-data historis inflow tersebut terlebih dahulu didiskritisasi dan pada langkah berikutnya diperhitungan probabilitas inflow yang dapat dipergunakan untuk memperkirakan besarnya inflow di masa datang.

Cara pendiskritisasian debit Inflow adalah sebagai berikut:

1. Data historis debit inflow selama 74 tahun (tahun 1928-2001) pada masing-masing *stage* (bulan) atau periode dibagi menjadi beberapa kelas inflow (*number inflow class*) dalam jumlah yang sama, sedemikian rupa sehingga *mean* dan *varians*-nya sama dengan debit observasi. Pembagian ini didasarkan pada nilai minimum dan maksimum inflow pada masing-masing *stage*.
2. Ketentuan aau persyaratan jumlah kelas adalah pada matrik transisi inflow yang akan dihasilkan harus stabil yakni tidak boleh ada dalam satu baris matriks tersebut yang bernilai 0 seluruhnya.
3. Jumlah Kelas pada masing-masing periode harus sama, misal jika jumlah kelas pada periode Januari (*stage* 1) adalah 10 maka pada periode yang lain Pebruari, Maret, dan seterusnyaapun harus sama yaitu 10 kelas pula. Semakin banyak kelas inflow pada suatu *stage* akan memperlama proses perhitungan program dinamik stokastik ini, hal ini berkait dengan kemampuan *processor* komputer atau yang diistilahkan dengan *curse of dimensionality*.
4. Rentang data pada masing-masing kelas dalam suatu periode (*stage*) harus sama namun tidak demikian jika dibandingkan dengan periode yang lain. Dalam artian rentang kelas pada masing-masing periode tidak harus sama.

5. Penentuan nilai representatif kelas inflow . Nilai representatif kelas inflow adalah nilai *modus* atau rata-rata inflow yang masuk ke dalam kelas data inflow tersebut. Nilai representatif kelas inflow ini merupakan variabel status (*state variable*) pada waduk.

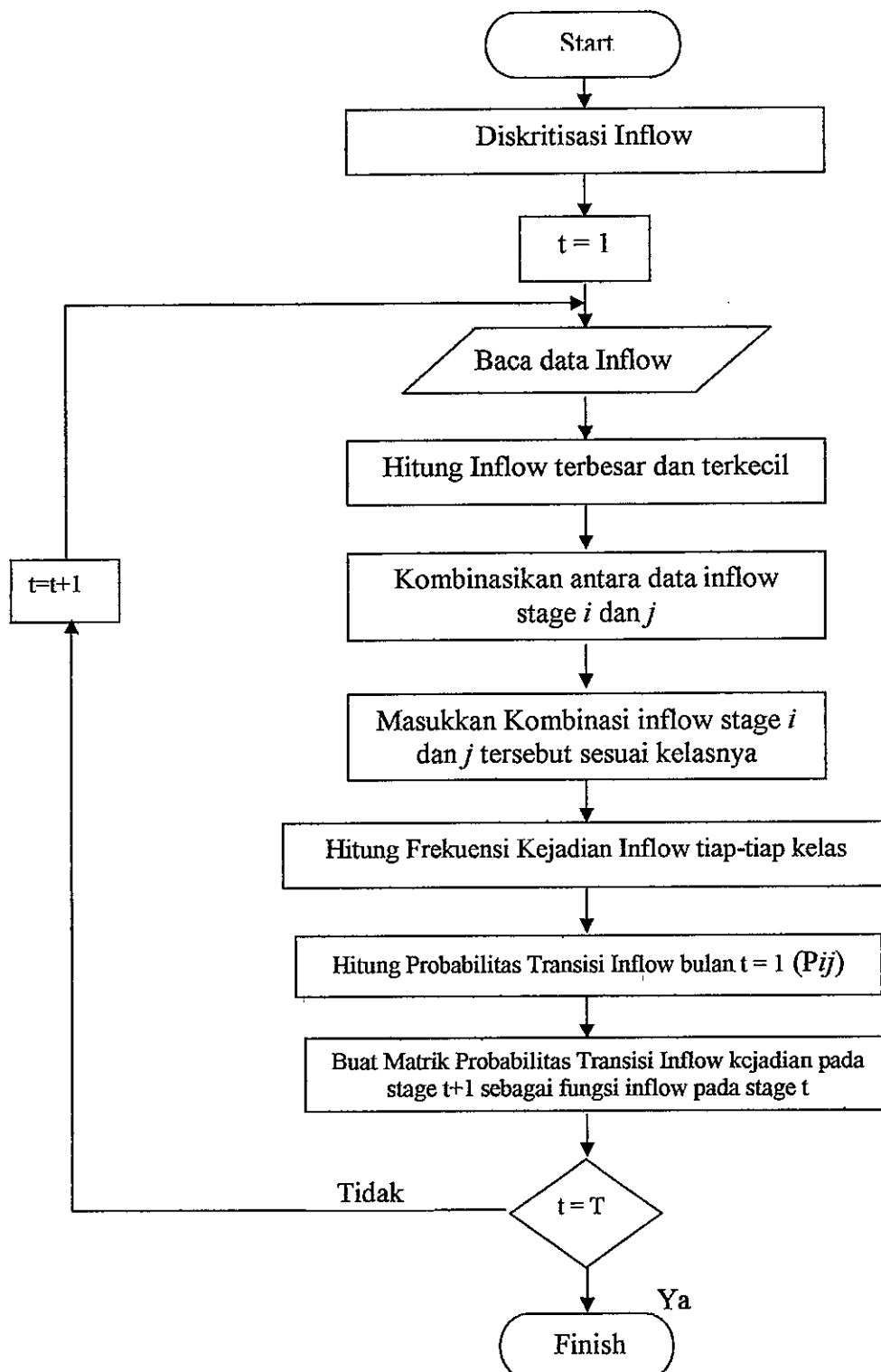
3.3.2 Matrik Probabilitas Transisi Inflow

Matrik probabilitas transisi inflow pada optimasi program dinamik stokastik menggambarkan hubungan antara debit inflow pada periode i dengan periode j . Jumlah n_{ij} adalah 12 yakni jumlah periode yang diperoleh dari jumlah bulan dalam 1 tahun.

Cara penyusunan matrik probabilitas transisi inflow adalah sebagai berikut :

1. Persiapkan kelas-kelas inflow periode i pada bagian vertikal ke bawah dan kelas-kelas inflow periode j horisontal ke kanan.
2. Persiapkan juga data-data inflow periode i dan j berdasarkan urutan tahun .
3. Dengan menggunakan sistem pencacahan maka besarnya inflow periode i dimasukkan pada baris kelas i dan ditarik horisontal untuk meletakkan nilai inflow periode j pada kolom kelas j dan ditandai dengan nilai 1.
4. Pencacahan terus dilakukan sampai pada tahun terakhir.
5. Selanjutnya dihitung frekwensi baris dan kolom tersebut untuk selanjutnya dijumlahkan dan ditotalkan secara horisontal.
6. Pembagian antara frekwensi pada suatu baris-kolom kelas inflow ij dengan jumlah total horisontal akan mendapatkan matrik probabilitas transisi inflow.

Tahapan penyusunan matrik probabilitas transisi inflow lebih lanjut dipaparkan dalam gambar *flow chart* di bawah ini :



Gambar 3.2.

Bagan Perhitungan Probabilitas Transisi Inflow

Pada program ini, periode waktu tahunan akan dibagi menjadi 12, yaitu periode bulanan. Seperti yang telah dikemukakan di atas bahwa 12 rantai Markov akan dibangun sesuai dengan banyaknya jumlah bulan dalam satu tahun. Elemen-elemen rantai Markov tersebut merupakan probabilitas transisi kejadian debit, untuk setiap nilai diskrit debit yang representatif.

P_{ij} , dapat didekati dengan membagi frekwensi kejadian inflow yang berubah dari status i ke j , n_{ij} , dengan jumlah total kemungkinan frekwensi kejadian inflow.

Persamaan bagi pernyataan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^{NIC} n_{ij}} \dots\dots\dots (3.4)$$

3.3.3 Diskritisasi Tampungan Waduk

Untuk mendapatkan nilai-nilai diskrit yang merepresentasikan kapasitas tampungan waduk pada periode tertentu, interval volume tampungan minimal dan volume maksimal pada periode tersebut dibagi ke dalam beberapa interval yang sama panjang. Nilai diskrit kapasitas tampungan adalah nilai-nilai batas interval tersebut.

Ada 3 skema pendekatan yang umumnya digunakan dalam pendiskritan tampungan waduk, yang pada dasarnya adalah membagi kapasitas tampungan aktif waduk dalam beberapa zona, ketiga skema tersebut adalah :

1. Skema klasik

Pada skema ini jumlah zona Z sama dengan SDN dan peningkatan tiap zona tampungan adalah $\Delta S = CAP/SDN$, pada skema ini tampungan kosong dan tampungan penuh tidak termasuk dalam pembagian nilai tampungan. CAP adalah kapasitas efektif waduk dan SDN adalah *Storage Discrete Number* (jumlah kelas tampungan)

2. Skema Moran

Pada skema ini nilai dari tampungan karakteristik didefinisikan sebagai pembatas dari zona-zona, jadi $Z = \text{SDN} - 1$, dengan $\Delta S = \text{CAP}/(\text{SDN}-1)$, berbeda dengan skema klasik, pada skema ini tampungan kosong dan tampungan penuh dimasukkan sebagai nilai yang ditetapkan. Definisi CAP dan SDN seperti pada penjelasan sebelumnya.

3. Skema Savarenskiy

Pada skema ini zona tampungan Z merupakan suatu kelas interval dimana $Z = \text{SDN} - 2$ dengan $\Delta S = \text{CAP}/(\text{SDN}-2)$, pada skema ini tampungan kosong dan tampungan penuh dimasukkan sebagai nilai yang ditetapkan seperti pada skema Moran. Definisi CAP dan SDN seperti pada penjelasan sebelumnya.

Dari ketiga skema diatas dipakai skema Savarenskiy dalam pendiskritisasian tampungan waduk kerana algoritma program dinamik stokastik yang menggunakan skema ini akan dapat lebih cepat mencapai keadaan *steady state* dibandingkan dengan skema Moran.

Cara pendiskritisasian tampungan waduk sebagai berikut :

1. Penentuan jumlah kelas tampungan waduk

Jumlah minimum kelas tampungan waduk yang digunakan dalam program dinamik dirumuskan sebagai berikut (Klimes, 1977 dalam Suharyanto, 1997) :

$$\text{SDN} = 4 S / D + 2 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

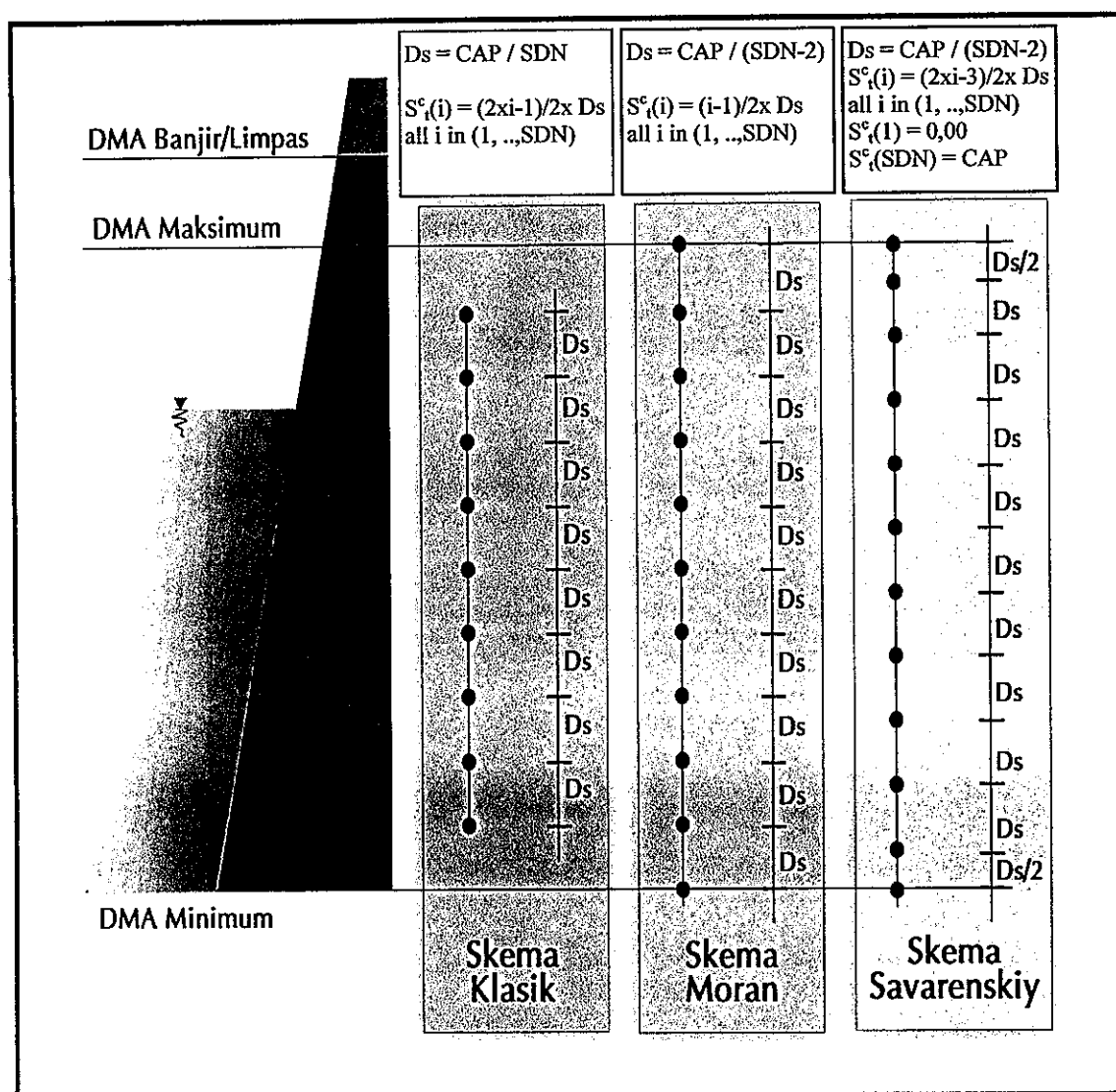
dimana :

SDN : Jumlah kelas tampungan yang diminta dalam program dinamik.,

S : Kapasitas tampungan aktif, D : Nilai rata-rata inflow

- Menentukan jumlah Zona tampungan dengan rumus $Z = \text{SDN} - 2$, dan rentang zona tampungan dengan rumus $\Delta S = \text{CAP}/(\text{SDN}-2)$
- Setelah nilai Z dan ΔS didapat maka diskritisasi tampungan disusun dalam tabel dimulai dari nilai tampungan minimum = 0 sampai tampungan penuh.

Untuk lebih jelasnya perbandingan ketiga skema tersebut, terdapat pada gambar berikut ini:



Gambar 3.3. Perbandingan 3 Macam Skema yang Dipergunakan dalam Pendiskritisasian Tampungan Waduk

3.3.4 Perhitungan Kinerja Sistem ($B_{k,i,l,t}$)

Seperti yang telah dijelaskan pada bab tinjauan pustaka perhitungan $B_{k,i,l,t}$ adalah cukup penting karena $B_{k,i,l,t}$ merupakan suatu fungsi tujuan jangka pendek dari perhitungan program dinamik stokastik.

Prosedur perhitungan $B_{k,i,l,t}$ ini cukup sederhana, yaitu sebagai berikut :

1. Terlebih dahulu menentukan besarnya target pelepasan bulanan (TR_t) dan target tampungan bulanan (TS_t) dari kebutuhan yang harus dipenuhi.
2. Program akan menghitung $B_{k,i,l,t}$ dengan persamaan di bawah ini :

$$B_{k,i,l,t} = (R_{k,i,l,t} - TR_t)^2 + (S_{k,t} - TS_t)^2 \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana :

$B_{k,i,l,t}$	= Kinerja sistem	$R_{k,i,l,t}$	= Pelepasan air waduk
TR_t	= Target pelepasan bulanan	TS_t	= Target tampungan bulanan
$S_{k,t}$	= Volume tampungan awal waduk		

Persamaan ini akan bernilai nol jika pelepasan sama dengan nilai targetnya. Jika terdapat deviasi dari masing-masing nilai target, maka akan mendapatkan nilai sebagai fungsi dari penyimpangan (deviasi) yang terjadi. Persamaan ini tidak tetap dalam artian dapat berubah apakah menggunakan deviasi release atau deviasi tampungan saja, bergantung pada bagian mana penekanannya. (Loucks, Daniel P. dkk, 1981).

3. Perhitungan terus dilakukan sampai akhir periode T.

3.3.5 Perhitungan Persamaan Rekursif

Persamaan rekursif dalam penjelasan pada bab tinjauan pustaka merupakan persamaan yang menyatakan hubungan antara nilai variabel status sebagai hasil optimasi

pada setiap tahap dengan nilai masukan variabel status tersebut dan variabel keputusan yang diambil pada tahap yang ditinjau.

Prosedur perhitungan persamaan rekursif ini adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan dimulai dari akhir *stage* karena perhitungan menggunakan sistem *backward moving algorithm*.
2. Pada perhitungan mula-mula, maka dari persamaan rekursif yang dijelaskan pada bab tinjauan pustaka hanya menghasilkan nilai $B_{k,i,l,t}$ karena $F_{t+1}^*(l, j)$ masih 0 (belum ada) yakni $F_t(k, i) = B_{k,i,l,t}$

3. Pada tahap berikutnya saat $t+1$ maka persamaan rekursif telah lengkap

$$F_t(k, i) = \text{Minimum}_l [B_{kilt} + \sum_j P_{ij}^{t+1} F_{t+1}^*(l, j)] \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

4. Perhitungan persamaan rekursif terus dilakukan sampai periode $t = 12$
5. Proses looping pada perhitungan rekursif terus terjadi sampai *stage* selanjutnya dan akan berhenti ketika tercapai keadaan *steady state* tercapai yaitu jika perbedaan antara $F_t^{n+2}(k, i)$ dengan $F_t^n(k, i)$ relatif tetap pada seluruh keadaan k, i , dan waktu t .

Demikianlah prosedur perhitungan persamaan rekursif program dinamik stokastik.

3.3.6 Penentuan Akhir Kebijakan Pengoperasian Waduk Hasil Optimasi

Apabila kondisi *steady state* telah tercapai dimana jika dan hanya jika nilai $f_t^*(k, i)$ (persamaan rekursi) tidak berubah dari tahun ke tahun, maka telah didapatkan suatu pola operasi waduk optimasi.

Pola operasi yang dihasilkan merupakan kebijakan pengoperasian yang *steady* untuk jangka panjang. Kebijakan pengoperasian waduk akan merupakan volume waduk pada akhir bulan ke t (pada awal bulan ke $t+1$) yang optimum sebagai fungsi dari

kombinasi debit masukan (*inflow*) dan volume tampungan awal (*storage*) pada periode tertentu. Sehingga dapat ditentukan besarnya pelepasan (*release*) air pada setiap periode.

3.4 Prosedur Optimasi Program Dinamik Stokastik

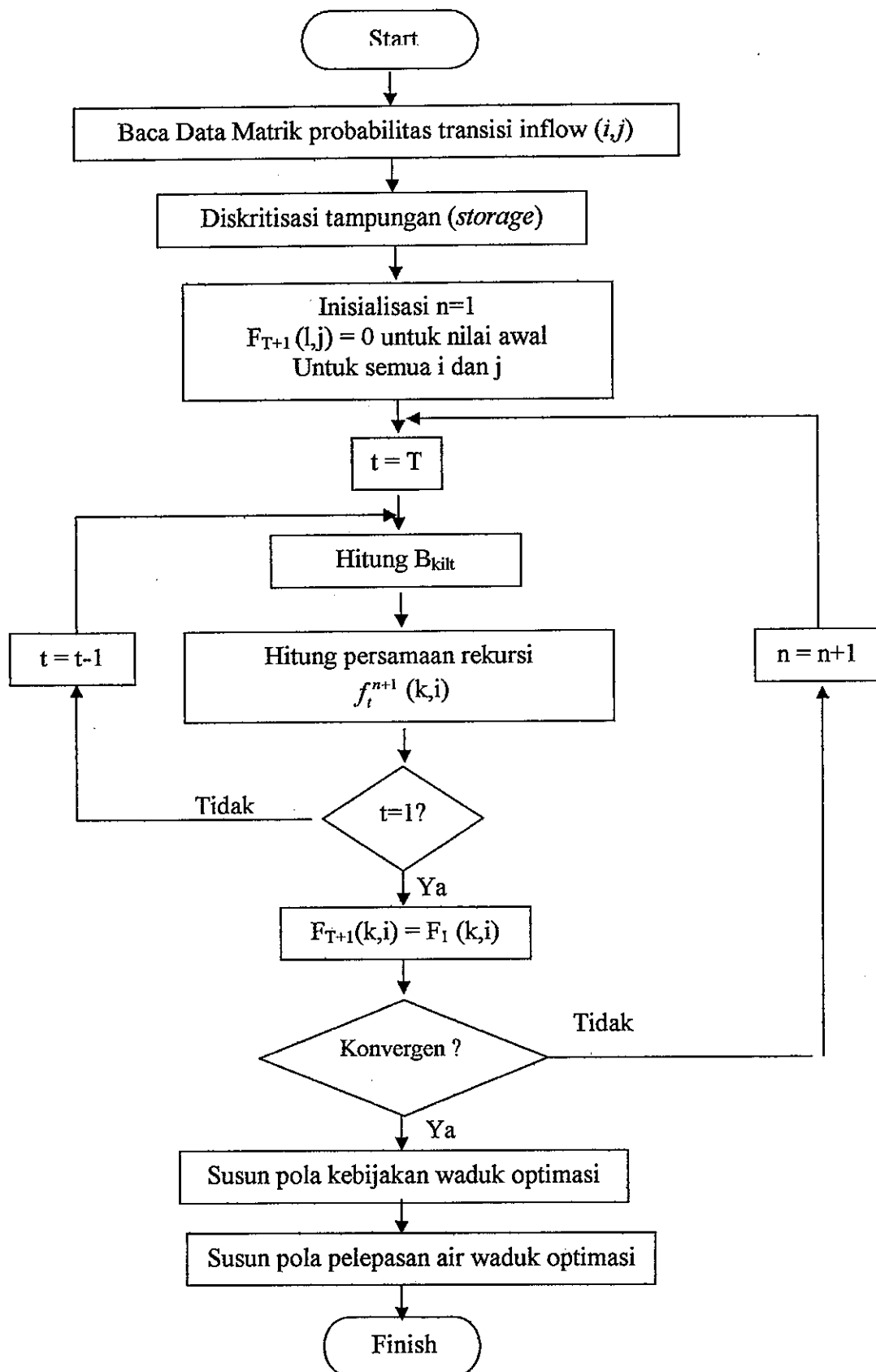
Prosedur optimasi diawali dengan analisis untuk menentukan kelas inflow dan tampungan. Langkah selanjutnya, adalah hitungan probabilitas transisi inflow. Hitungan ini dilakukan dengan model yang terpisah dari model rekursif namun merupakan suatu rangkaian yang utuh dari prosedur pengoptimasian waduk.

Setelah probabilitas transisi inflow diketahui, langkah optimasi dimulai. Hitungan diawali dengan penentuan nilai awal hasil sistem pada bulan terakhir dari siklus operasi yang umumnya diberi nilai nol.

Iterasi optimasi dalam siklus dilakukan dengan algoritma mundur, dari bulan terakhir sampai bulan pertama. Hitungan iterasi tersebut diulang dengan nilai awal hasil sistem pada bulan terakhir sama dengan nilai masukan pada bulan pertama iterasi sebelumnya. Hitungan selesai dengan dipenuhinya kriteria konvergensi.

Setelah kriteria konvergensi didapat maka akan didapatkan kondisi yang tetap dan mendapatkan hubungan antara volume tampungan mula-mula (*initial storage*), volume tampungan akhir (*final storage*) dan debit masukan (*inflow*) pada satu periode.

Diagram alur (*flowchart*) perhitungan optimasi seperti yang dijelaskan terdapat di dalam Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4. Bagan Alir Model Program Dinamik Stokastik

3.5 Model Simulasi

Simulasi operasi waduk dilakukan untuk menghitung produksi listrik bulanan. Simulasi operasi waduk dilakukan dengan data inflow selama 6 tahun.

Pola operasi hasil optimasi dipakai sebagai pedoman dalam simulasi operasi ini. Pola operasi tersebut menunjukkan tampungan akhir yang harus dicapai pada akhir bulan apabila diketahui tampungan pada awal bulan dan inflow yang terjadi pada bulan tersebut.

Awal simulasi ditentukan pada awal bulan Januari, sebagai permulaan dalam penyusunan pola pengoperasian waduk Saguling. Kendala-kendala yang ada, baik yang menyangkut tampungan dan debit turbin diperhatikan juga dalam simulasi operasi.

Hasil simulasi akan menunjukkan keadaan *artificial* dari kondisi nyata di lapangan sehingga dapat dibandingkan hasil antara pola operasi waduk Saguling eksisting dengan pola operasi waduk Saguling setelah dioptimasi.

Adapun batasan-batasan dalam simulasi sebagai berikut :

1. Data masukan pada simulasi antara lain adalah data debit inflow, tampungan yang diperoleh dari perhitungan optimasi dan target pelepasan yang akan dicapai.
2. Apabila tinggi elevasi yang diperoleh dari optimasi lebih kecil dari elevasi minimum operasi waduk Saguling +623 m dpl atau saat volume aktif 0 MCM (juta m³) maka pengoperasian pada bulan tersebut dinyatakan gagal.
3. Apabila tinggi optimasi lebih besar dari tinggi elevasi maksimum operasi waduk Saguling +643 m dpl atau saat volume aktif 611 MCM (juta m³) berarti terjadi limpasan maka besarnya limpasan yang terjadi harus dihitung.
4. Pada simulasi akan terjadi berbagai kemungkinan sebagai berikut (Makrup, 1995, dalam Gunawan G., 2002) :

- a. Tampungannya pada akhir operasi lebih kecil dari tampungannya pada awal operasi atau tampungannya pada bulan tertentu lebih kecil dari tampungannya minimum maka target yang diperoleh dari keluaran program tidak terpenuhi.
 - b. Tampungannya pada bulan tertentu lebih besar dari tampungannya maksimum maka akan terjadi limpasan.
 - c. Jika keadaan a) terjadi maka langkah selanjutnya yang dilakukan adalah memenuhi target energi sampai terpuhinya kondisi dimana volume waduk berada dalam kondisi $S_{i,13} \geq S_{i,1}$ dan $S_{i,j} > S_{\min}$
5. Hasil optimasi keluaran program dianggap baik apabila kondisi yang sebenarnya akan tercapai suatu kondisi dimana volume waduk tiap bulan lebih besar dari volume minimum dan lebih kecil dari volume maksimum.
 6. Asumsi yang digunakan pada simulasi awal pengoperasian, inflow, outflow dan energi listrik mengikuti keadaan/kondisi aktual dari tahun perhitungan, sedangkan data awal volume simulasi adalah volume maksimal aktif 611 MCM (juta m^3) waduk atau saat elevasi air +643 m dpl.
 7. Pada pembacaan pola kebijakan operasi waduk jika volume tampungannya awal bulan berada pada kondisi transisi di antara 2 kelas tampungannya, maka volume tampungannya tersebut diklasifikasikan dalam kelas di bawahnya.
 8. Release dari waduk merupakan fungsi dari volume awal bulan dan inflow pada bulan tersebut dan tampungannya akhir bulan hasil optimasi.
 9. Persamaan yang digunakan untuk menentukan hubungan ketiga variabel tersebut pada simulasi ini adalah (Petrus, 1997) :

$$V = 0.742305 H^2 - 909.6530 H + 278878.2$$

$$H = -0.000026 V^2 + 0.061815 V + 608.4709$$

dimana :

H : Tinggi elevasi muka air waduk (m)

V : Volume air waduk ($\text{Mm}^3 = 10^6 \text{ m}^3$)

Selain dari persamaan di atas ada juga persamaan lainnya yang menyatakan hubungan antara elevasi waduk dengan volume tampungan aktif, persamaan tersebut sebagai berikut (Nugroho. Hari, 1999):

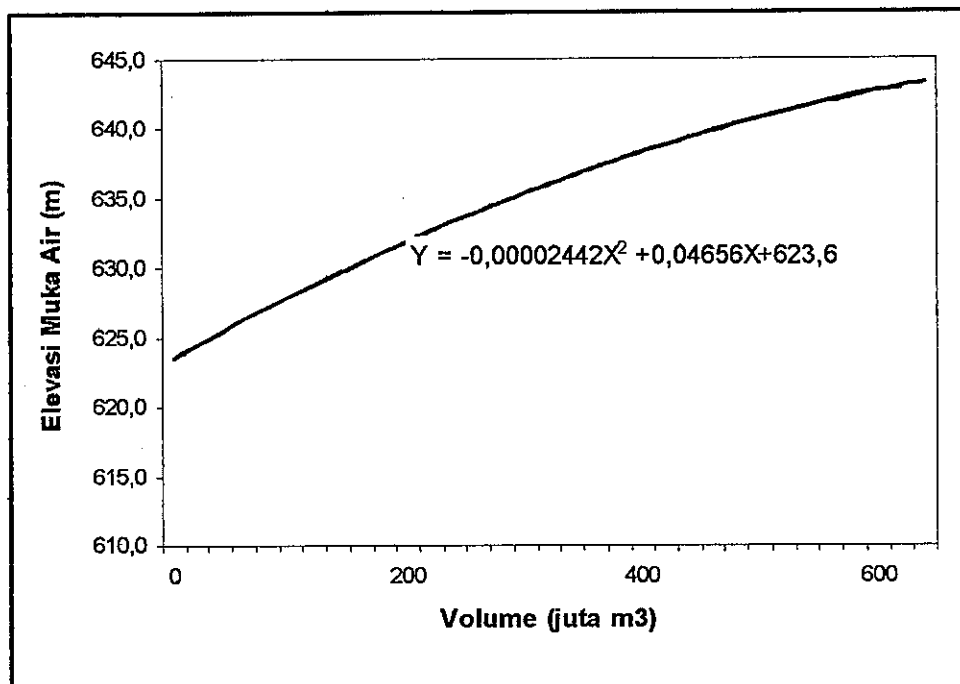
$$H = -0,0000244 V^2 + 0,04656 V + 623,6$$

dimana :

H : Tinggi elevasi muka air waduk (m)

V : Volume air waduk ($\text{Mm}^3 = 10^6 \text{ m}^3$)

Dan kurva hubungan variabel-variabel di atas ditampilkan dalam gambar berikut ini:



Gambar 3.5

Kurva Hubungan Antara Elevasi Waduk dengan Volume Tampungan Aktif Waduk

10. Perhitungan energi listrik hasil simulasi bulanan dengan rumus

$$E = 9,8 \times \rho \times Q_{(t)} \times h_{(t)} \times n \text{ hari dalam 1 bulan}$$

11. Data teknis dari waduk yang digunakan untuk perhitungan simulasi ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Data Teknis Waduk Saguling untuk Simulasi

No	Parameter	Satuan	Nilai
1	η turbin	(-)	0.915
2	η generator	(-)	0.98
3	Kapasitas	[MW]	715
4	H max	[m]	643
5	H ₀	[m]	252
6	H min (turbin)	[m]	623
7	H min (outlet)	[m]	56
8	Tampungan Maksimum	[Mm ³]	875
9	Tampungan Mati	[Mm ³]	264
10	Tampungan Aktif	[Mm ³]	611

Sumber : Hasil Perhitungan

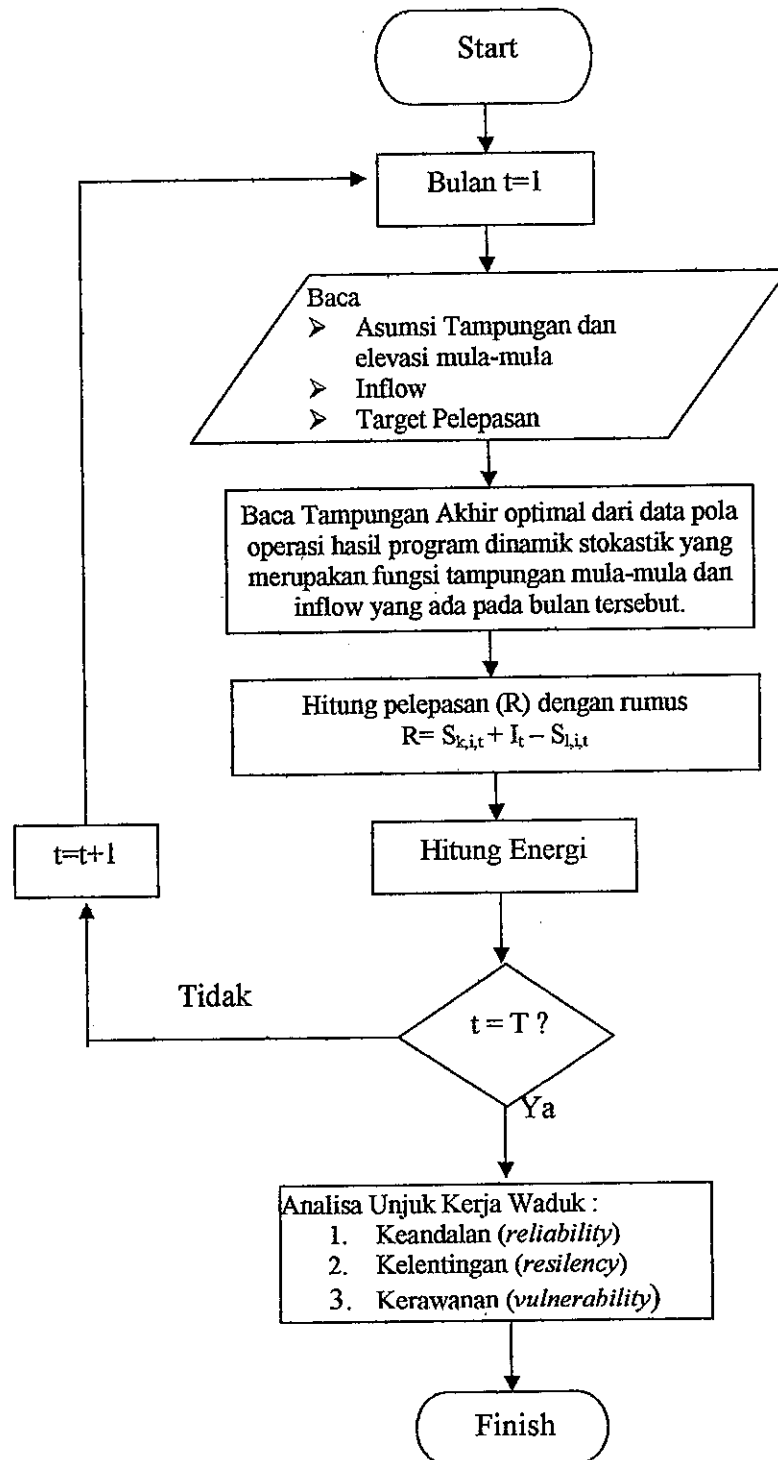
3.6 Analisa Unjuk Kerja

Kinerja Pengoperasian Waduk merupakan indikator waduk dalam pengoperasiannya untuk memenuhi kebutuhan. Beberapa indikator untuk menilai besarnya *performance* operasi waduk dapat meliputi keandalan (*reliability*), kelentingan (*resiliency*) dan kerawanan (*vulnerability*) (Suharyanto, 1997).

Bahasan akhir setelah simulasi adalah memeriksa unjuk kerja waduk (*performance*)nya yang meliputi :

1. Keandalan (*reliability*)
2. Kelentingan (*resiliency*)
3. Kerawanan (*vulnerability*)

Tahapan dalam bentuk diagram alur (*flowchart*) simulasi dan perhitungan analisa unjuk kerja waduk di atas diuraikan dalam Gambar 3.6 di bawah ini.



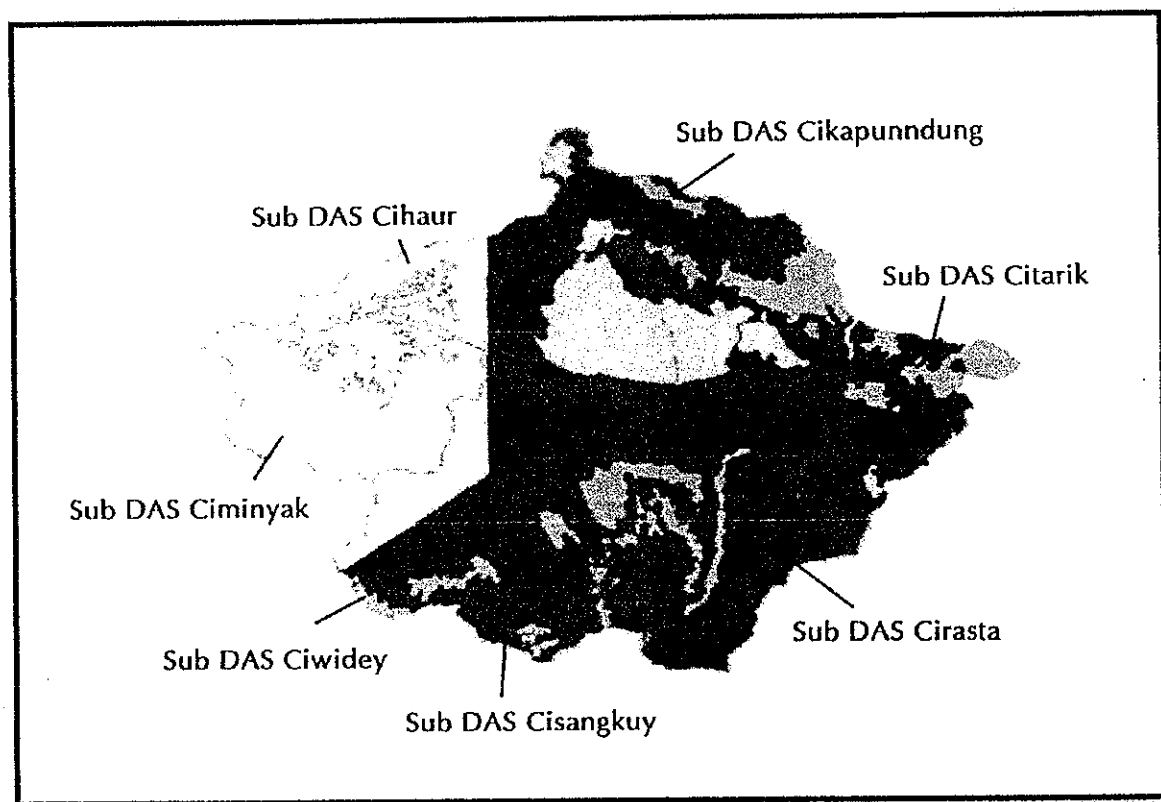
Gambar 3.6 Bagan Alir Model Simulasi dan Analisa Unjuk Kerja Waduk

BAB IV

KOMPILASI DATA

4.1 Gambaran Umum Daerah Studi

Sungai Citarum merupakan sungai besar di Propinsi Jawa Barat dengan sumber mata airnya terdapat di gunung Wayang, berada di selatan kota Bandung. Sungai ini memiliki panjang kurang lebih 102 Km.

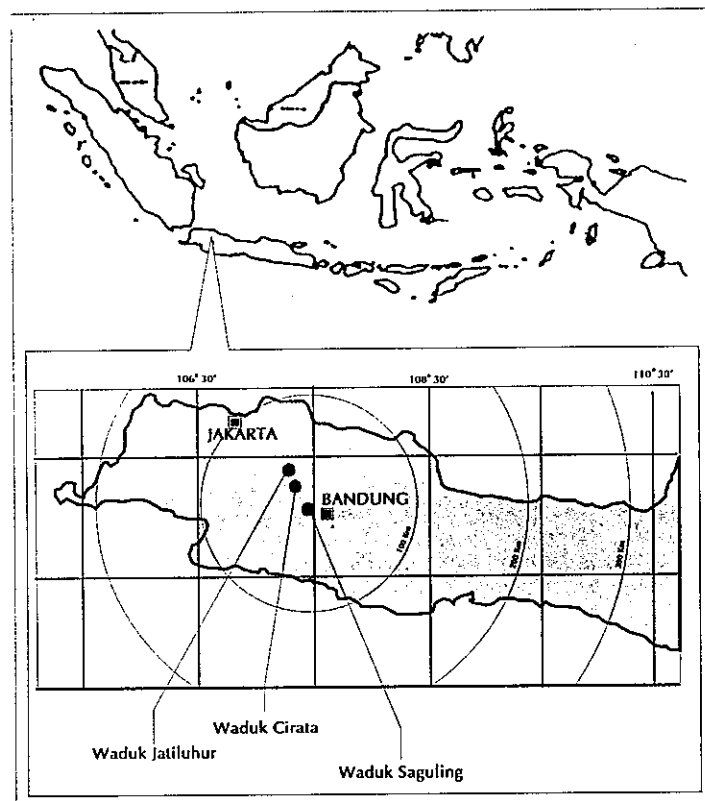


Gambar 4.1 Peta DAS Saguling Jawa Barat

Daerah Aliran Sungai (DAS) Saguling (2.283 km^2) merupakan satu sub wilayah satuan sungai Citarum (6.000 km^2) (lihat Gambar 4.1 Peta DAS Saguling Jawa Barat),

dengan besarnya curah hujan tahunan 3.222 mm. Daerah ini meliputi sebagian besar Kabupaten Bandung dan seluruh Kotamadya Bandung serta sebagian Kabupaten Sumedang. Dikelilingi rangkaian pegunungan : G. Tangkuban Perahu (+ 2.076), G. Bukit Tunggul (+2.209), G. Guntur (+2.249), G. Malabar (+ 2.321) dan G. Patuha (+2.434).

Pada bagian hulu seperti yang terdata di atas, merupakan dataran tinggi, sehingga banyak tempat yang sangat cocok sebagai pembangkit listrik tenaga air. Saat ini di sepanjang sungai Citarum terdapat tiga waduk yaitu waduk Saguling, waduk Cirata dan waduk Jatiluhur atau Juanda yang telah dibangun Pemerintah Indonesia (lihat *Gambar 4.2* Peta lokasi ketiga waduk di Jawa Barat). Walaupun ketiga waduk berada dalam satu aliran sungai Citarum, akan tetapi manajemen pengelolaannya berbeda-beda.



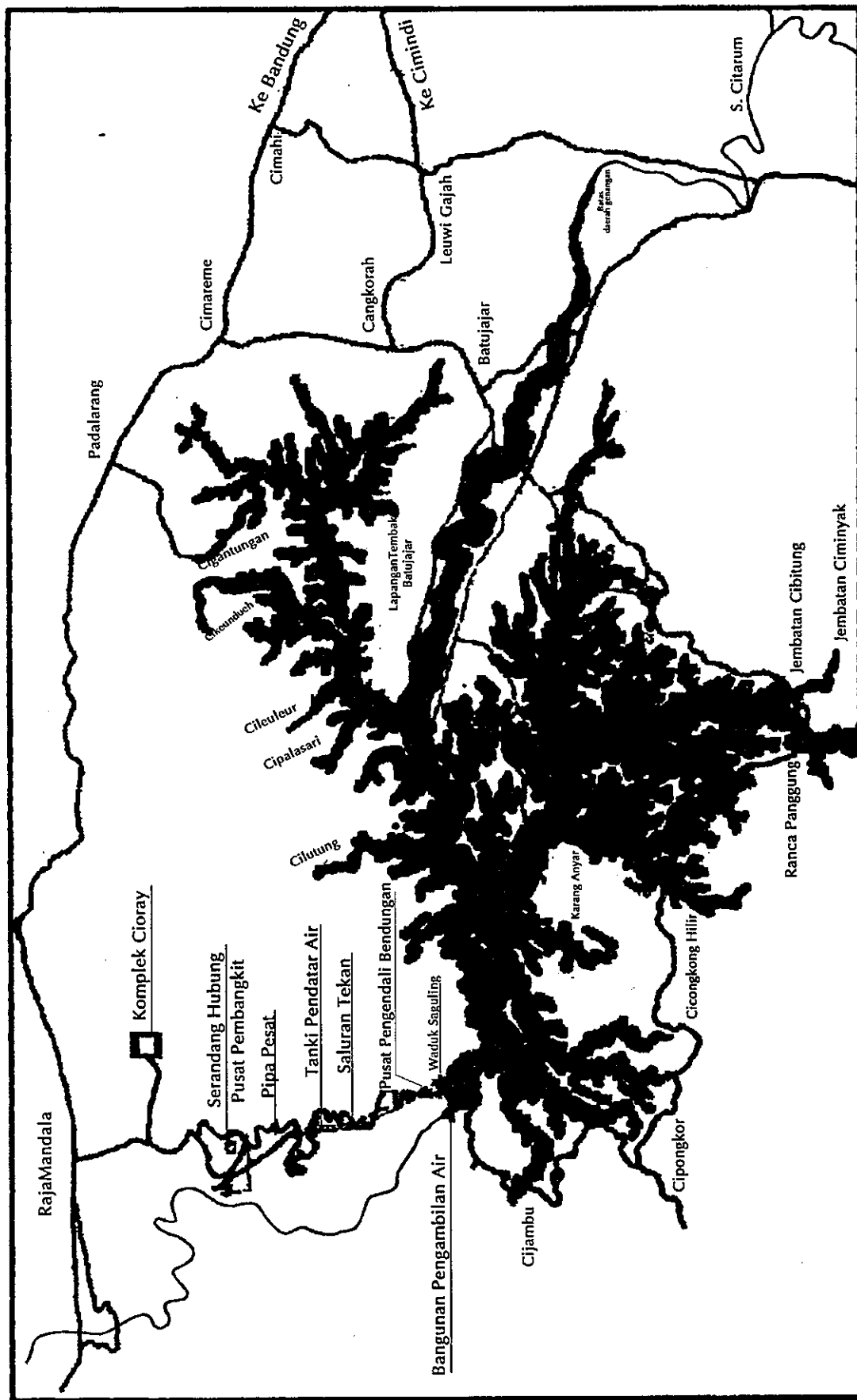
Gambar 4.2 Peta Lokasi Ketiga Waduk di Jawa Barat

Waduk Saguling dan Cirata dikelola oleh PT. PLN, sedangkan waduk Juanda/Jatiluhur dikelola oleh Perum Otorita Jatiluhur. Hal ini disebabkan karena waduk Saguling dan waduk Cirata memiliki fungsi utama sebagai PLTA, berbeda dengan waduk Jatiluhur/Juanda, yang memiliki banyak fungsi seperti pembangkit listrik, irigasi, penyediaan air perkotaan, air baku untuk industri dan penggelontoran (*flushing*).

Waduk Saguling yang terletak di Desa/Kecamatan Batujajar Kabupaten Bandung Propinsi Jawa Barat, pembangunannya berlangsung dari tahun 1980 sampai tahun 1986. Besarnya dana untuk pembangunan adalah sebanyak US \$ 238.492.350 (IBRD), US \$ 135.635.000 (OECD), dan US \$ 364.125.750 (APBN).

Volume waduk pada MA banjir 970 juta m³, akan tetapi MA normal dan volume efektif masing-masing berurut adalah 875 juta m³ dan 611 juta m³ (DPU, Bendungan Besar di Indonesia, 1995). Kapasitas terpasang PLTA Saguling sebanyak 4 x 175 MW dengan energi yang dapat dihasilkan sebesar 2.156 GWH, menjadikan waduk Saguling sebagai waduk dengan kapasitas terbesar dibanding PLTA lainnya yang ada di sepanjang sungai Citarum. (lihat Gambar 4.3 : Peta Situasi PLTA Saguling).

PLTA Saguling ini termasuk dalam sistem jaringan inter koneksi kelistrikan se Jawa-Bali yang berfungsi untuk memikul beban puncak listrik juga sebagai pengatur frekuensi beban listrik se Jawa-Bali. Hal ini dapat diterapkan melalui penggunaan peralatan LFC (*Load Frekuensi Control*) di PLTA Saguling. Energi listrik yang dihasilkan disalurkan melalui GITET (Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi) dan dihubungkan ke sistem inter koneksi Jawa-Bali melalui Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET 500 KV). Agar dapat diterima dan dimanfaatkan oleh konsumen maka energi dari SUTET 500 KV tersebut diteruskan melalui Gardu Induk (GI) dan gardu distribusi yang berada dekat dengan konsumen (PT. PLN Unit Pembangkitan Saguling, 2000).



Gambar 4.3 Peta Situasi PLTA Saguling

4.2 Pengelolaan Waduk Eksisting

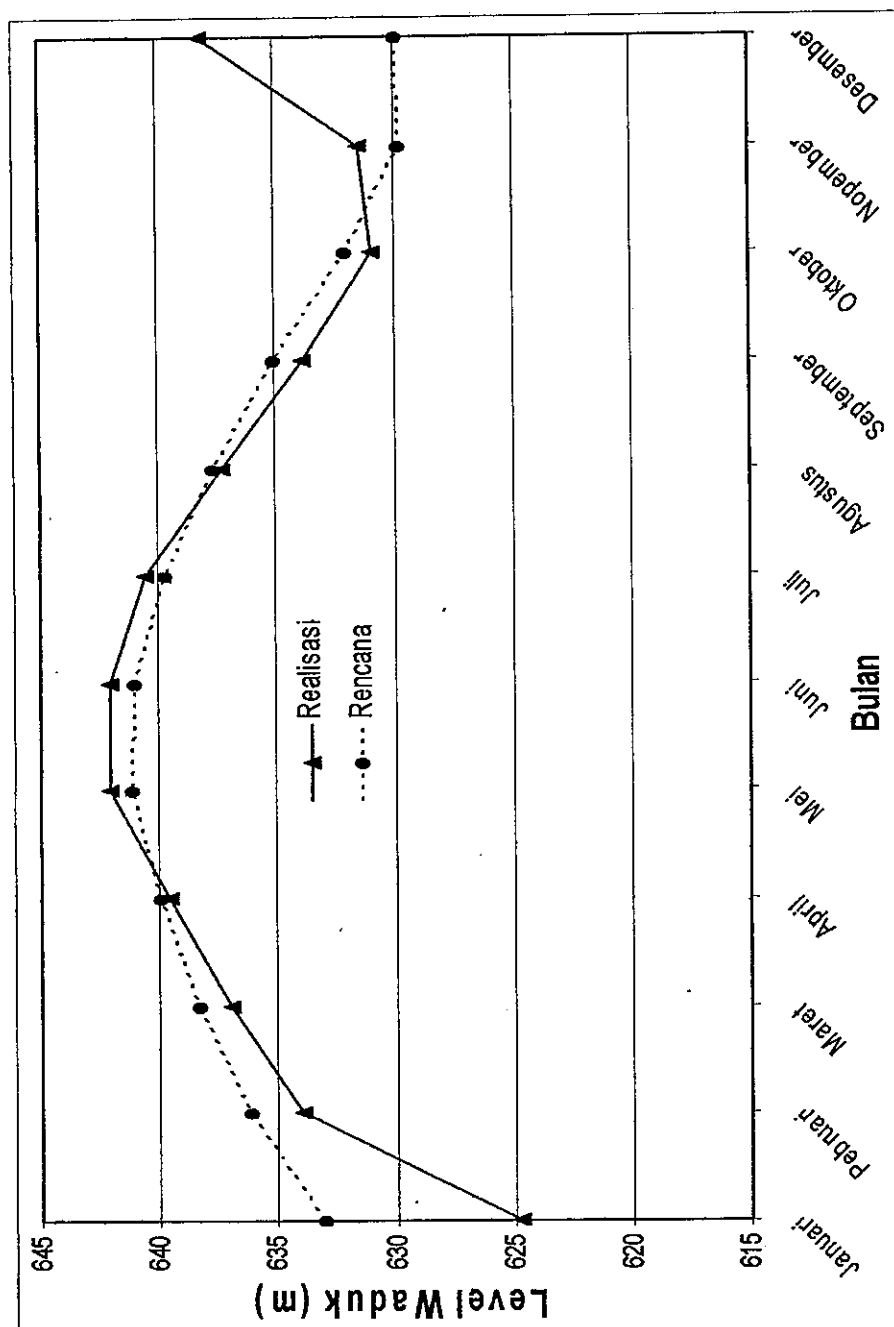
Sistem pengoperasian waduk Saguling, Cirata dan waduk Juanda yang merupakan waduk seri seperti yang dijelaskan dalam bahasan sebelumnya disusun oleh tim yang dinamakan dengan SPK-TPA (Sekretariat Pelaksana Koordinasi Tata Pengaturan Air). Untuk tahun 2001 dalam perencanaan ditetapkan TMA (Tinggi Muka Air) minimum operasi pada tahun normal waduk Saguling adalah +625 m dpl, sedangkan TMA maksimum operasi adalah +643 m dpl. Sementara itu TMA awal operasi waduk Saguling adalah +633.02 m dpl. Namun dalam realisasinya terdapat perbedaan-perbedaan dalam penentuan elevasi dan pelepasan air seperti terdapat dalam tabel di bawah ini :

Tabel 4.1 Pola Operasi Waduk Saguling Rencana dan Realisasi Tahun 2001

Bulan	Rencana (m)	Realisasi (m)
Januari	633,02	624,80
Februari	636,14	633,96
Maret	638,31	637,02
April	639,91	639,56
Mei	641,10	642,10
Juni	641,02	642,03
Juli	639,72	640,58
Agustus	637,68	637,27
September	635,07	633,83
Oktober	632,02	630,88
Nopember	629,69	631,43
Desember	629,83	638,17

Sumber : SPK-TPA 2001

Jadi pola operasi waduk ditetapkan berdasarkan debit air masuk. Tinggi muka air awal operasi ditentukan berdasarkan kesepakatan pada pertemuan rutin tahunan. Produksi listrik eksisting yang dihasilkan terdiri dari energi total (*total power*), energi utama (*firm power*) dan energi cadangan (*auxilliary power*).



Gambar 4.4 Pola Operasi Waduk Saguling Rencana dan Realisasi Tahun 2001

Energi total merupakan penjumlahan dari energi utama dan energi cadangan dimana energi utama adalah energi yang diproduksi sesuai dengan permintaan konsumen dan biasanya telah ditentukan untuk tiap tahunnya. Energi cadangan adalah kelebihan energi yang dapat digunakan sewaktu-waktu apabila ada permintaan mendadak.

4.3 Karakteristik PLTA Saguling

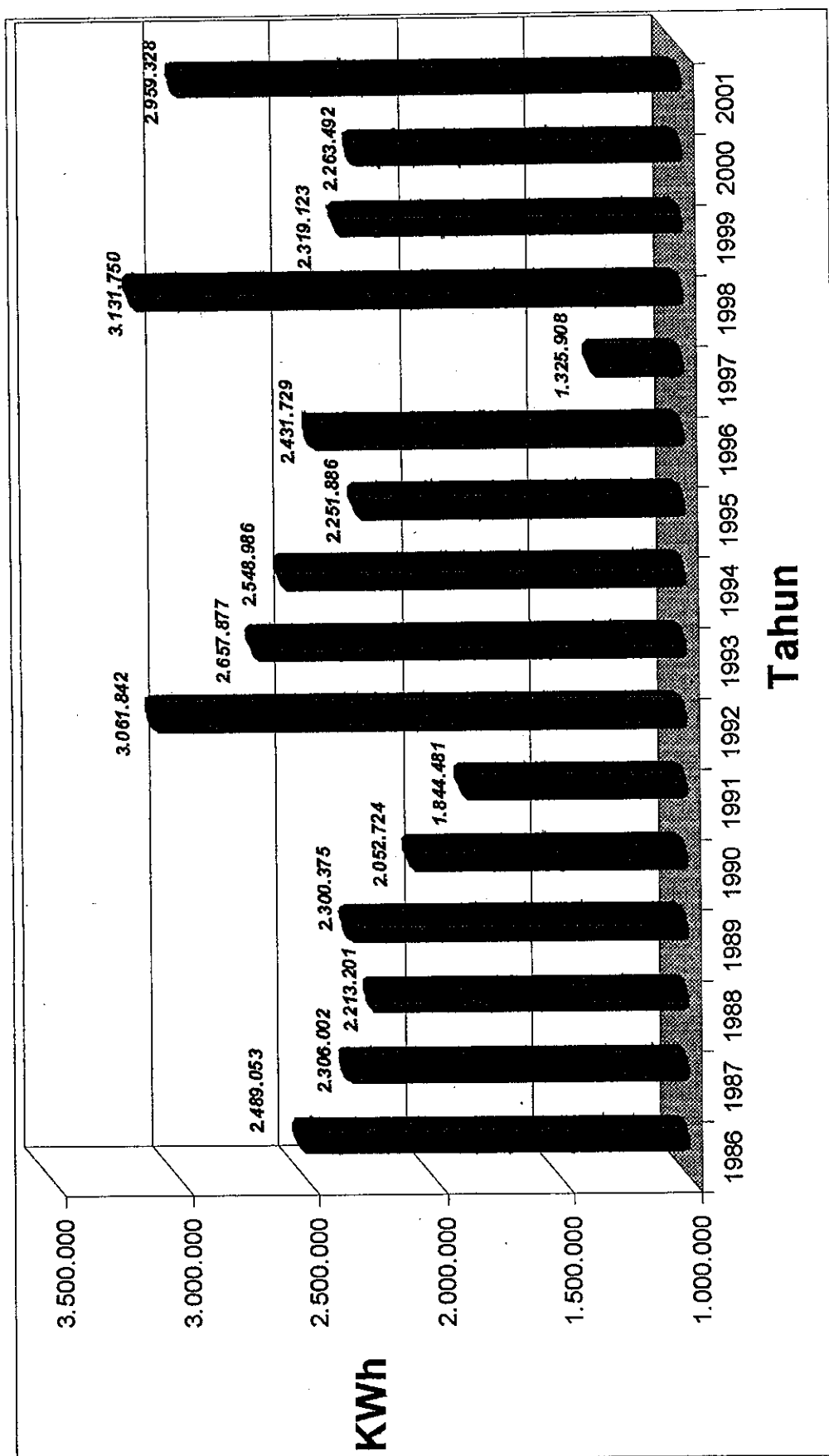
4.3.1 Produksi Listrik PLTA Saguling

PLTA Saguling sejak mulai beroperasi tahun 1986 sampai tahun 2001 telah menghasilkan listrik 38.157.757 KWh dengan rata-rata produksi 2.385 GWh/th. Data selengkapnya pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.2 Produksi Listrik PLTA Saguling Tahun 1986-2001

Tahun	KWH	Tahun	KWH
1986	2.489.053	1994	2.548.986
1987	2.306.002	1995	2.251.886
1988	2.213.201	1996	2.431.729
1989	2.300.375	1997	1.325.908
1990	2.052.724	1998	3.131.750
1991	1.844.481	1999	2.319.123
1992	3.061.842	2000	2.263.492
1993	2.657.877	2001	2.959.328

Sumber : Indonesia Power 2002



Gambar 4.5 Produksi Listrik PLTA Saguling Tahun 1986-2001

4.3.2 Data Teknis

Data teknis waduk Saguling disajikan pada tabel-tabel berikut ini :

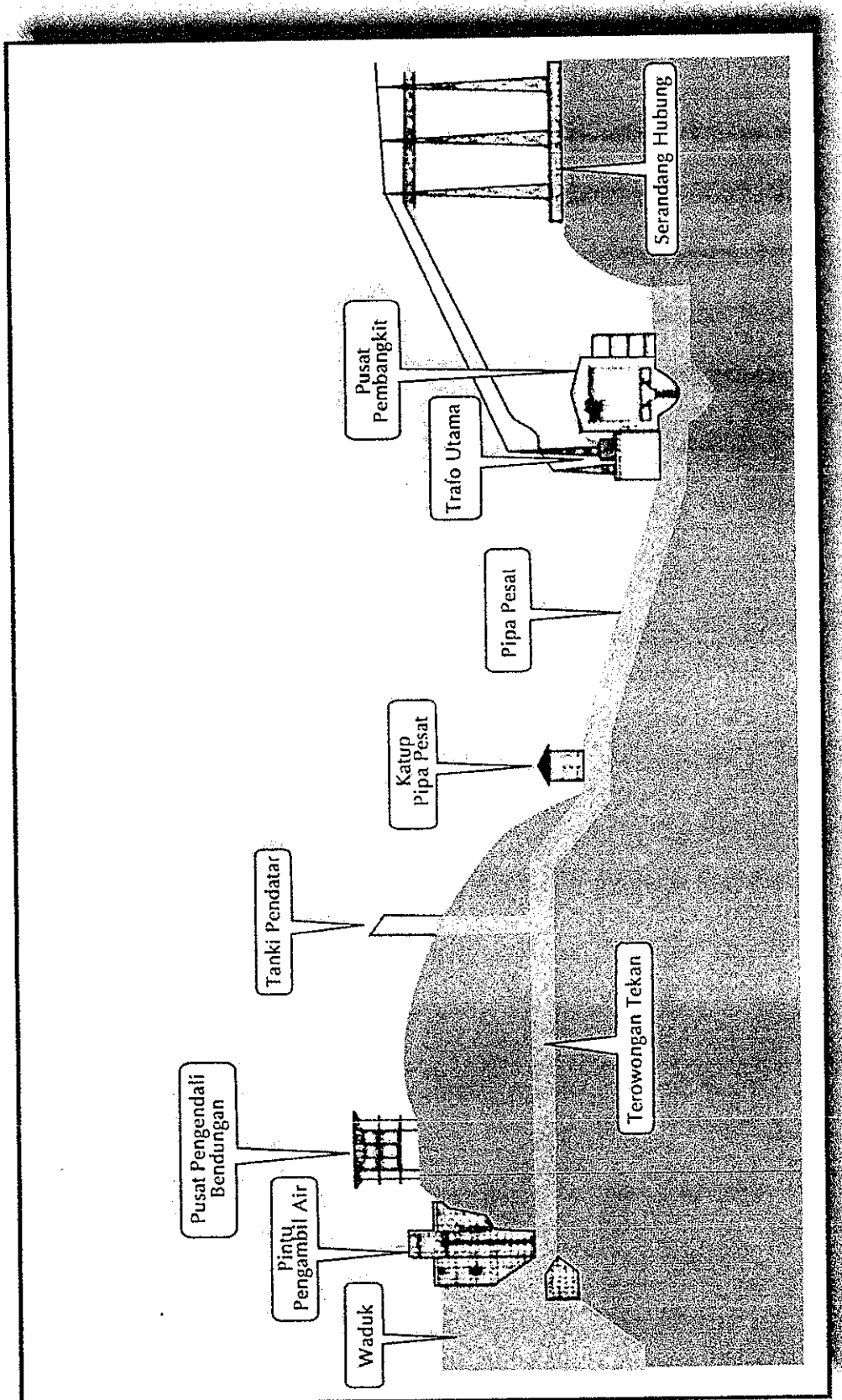
Tabel 4.3. Data Teknis Waduk

Bendungan :		Sal. Pelimpah :	
Tipe	: Urugan Tanah	Tipe	: Pelimpah samping
Tinggi	: 99,0 m	Kapasitas	: 2.400 m ³ /det
El. puncak	: 650,5 m	Pintu	: 3 bh, l=10 &t=8.3
Panjang puncak	: 301,4 m		
Isi tubuh	: 2,79 juta m ³	Intake	
		Tipe	: Menara
Waduk :		Lebar	: 50 m
El. ma. banjir	: + 645 m	Panjang	: 29 m
El. ma. maksimum	: +643 m	kap. Air masuk	: maks 224 m ³ /det
El. ma. minimum	: +623 m	Pintu	: 2 bh, l=10 &t=8.3
El. ma. belakang	: +252 m		
El. ma. sedimen	: +610 m	Turbin :	
Luas DAS lokal	: + 2.283	Jumlah/tipe	: 4 unit/Francis
(km ²)		Kapasitas terpasang	: 175 MW/unit
		Debit maksimum	: 228 m ³ /det
		Effisiensi total	: 0,879
		Letak turbin	: 252,2 m

Sumber : PLN sektor Saguling

Daerah kerja dari PLTA Saguling sebagai berikut (lihat Gambar 4.6):

1. Waduk
2. Pintu Pengambilan Air
3. Terowongan Tekan
4. Pusat Pengendali Bendungan
5. Tangki Pendatar
6. Katup Pipa Pesat
7. Pipa Pesat
8. Trafo Utama
9. Pusat Pembangkitan
10. Serandang Hubung



Gambar 4.6 Denah Kerja PLTA Saguling

4.3.3 Data Pendukung

Data tambahan meliputi iklim regional, data pengelolaan waduk eksisting dan peta-peta yang berhubungan dengan daerah studi serta data-data lain yang diperoleh dari beberapa sumber seperti : Studi-studi yang dilakukan berbagai pihak di kawasan DAS Citarum Saguling, BMG, Puslitbang Pengairan Departemen PU, Dinas Pengairan Kabupaten Bandung, PLN Sektor Cioray dan Saguling Dam Control Center di Komplek Waduk Saguling.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Masukan Program

Sebelum program dinamik stokastik dijalankan maka terlebih dahulu dipersiapkan beberapa data sebagai input pada program. Data-data tersebut disusun menjadi beberapa kelompok data seperti yang telah dibahas pada bab metodologi, yaitu :

1. Data Diskritisasi Inflow
2. Data Diskritisasi Tampungan Waduk (*storage*)
3. Data Evaporasi
4. Data Target Pelepasan

5.1.1 Data Diskritisasi Debit Masukan (*Inflow*)

Data debit inflow pada kasus ini dikumpulkan selama 74 tahun (1928-2001) dan didiskritisasi menjadi 3 kelas dengan rentang yang sama dalam setiap periode, dalam hal ini periode inflow adalah jumlah bulan dalam setahun. Pengambilan 3 kelas tersebut berdasarkan suatu pertimbangan agar matrik transisi yang diperoleh dalam keadaan stabil yaitu keadaan dimana suatu baris pada matrik tersebut tidak terdapat nilai 0 nya, yang nantinya akan dapat berpengaruh dalam proses perhitungan pada tahap-tahap optimasi. Pembagian inflow selama 74 tahun dalam 12 periode dengan 3 kelas tersebut disajikan dalam Tabel 5.1.

Dalam Tabel 5.1 ini juga terdapat nilai inflow representatif dari masing-masing kelas inflow yaitu satu nilai inflow yang mewakili kelas tersebut. Nilai inflow representatif ini merupakan data nilai *Modus* dari rentang masing-masing kelas inflow.

Tabel 5.1 Diskritisasi Inflow Tiap-tiap Bulan yang
Masing- masing dibagi dalam 3 Kelas (*Satuan MCM*)

Periode	Kelas	Rentang Inflow			Inflow Representatif	Jumlah Data
Januari	1	128,831	-	314,801	243,340	36
	2	314,802	-	500,772	385,681	30
	3	500,773	-	686,742	587,273	8
Pebruari	1	89,199	-	250,018	193,253	24
	2	250,019	-	410,838	318,216	34
	3	410,839	-	571,657	476,326	16
Maret	1	107,136	-	365,423	251,445	38
	2	365,424	-	623,711	480,559	30
	3	623,712	-	881,997	724,820	6
April	1	85,536	-	276,480	194,983	16
	2	276,481	-	467,425	382,895	41
	3	467,426	-	658,368	555,191	17
Mei	1	57,050	-	267,126	181,760	44
	2	267,127	-	477,203	348,192	24
	3	477,204	-	687,277	567,330	6
Juni	1	18,144	-	277,344	134,391	68
	2	277,345	-	536,545	356,193	5
	3	536,546	-	795,744	795,744	1

Periode	Kelas	Rentang Inflow			Inflow Representatif	Jumlah Data
Juli	1	1,339	-	138,027	62,037	58
	2	138,028	-	274,716	191,505	14
	3	274,717	-	411,402	389,172	2
Agustus	1	1,339	-	158,115	54,025	68
	2	158,116	-	314,892	178,488	5
	3	314,893	-	471,666	471,666	1
September	1	0,259	-	107,741	37,249	59
	2	107,742	-	215,224	144,155	13
	3	215,225	-	322,704	272,938	2
Oktober	1	1,071	-	238,288	90,056	65
	2	238,289	-	475,506	310,628	8
	3	475,507	-	712,722	712,722	1
Nopember	1	20,736	-	208,224	112,531	34
	2	208,225	-	395,713	294,589	32
	3	395,714	-	583,200	474,725	8
Desember	1	63,746	-	241,770	169,342	24
	2	241,771	-	419,795	330,456	32
	3	419,796	-	597,819	492,796	18

Sumber : Hasil Perhitungan

5.1.2 Data Diskritisasi Tampungannya Waduk (Storage)

Nilai tampungan waduk yang digunakan adalah tampungan waduk aktif, yakni tampungan yang diperoleh dari pengurangan tampungan maksimum waduk dengan tampungan mati (*dead storage*), besarnya adalah 611 MCM.

Jumlah minimum kelas tampungan waduk yang digunakan dalam program dinamik dirumuskan sebagai berikut (Klemes, 1977 dalam Suharyanto, 1997) :

S = Kapasitas tampungan aktif = 611 MCM, D = Nilai rata-rata inflow = 228,02 MCM

$$SDN = 4 S / D + 2 = 4 \times 611 / 228,02 + 2 = 13 \text{ kelas.}$$

Jadi jumlah kelas tampungan minimum adalah 13 kelas.

Tampungan aktif waduk pada kasus ini akan didiskritisasikan ke dalam 15 kelas, dengan menggunakan skema *Savarenskiy*. Diharapkan dari penggunaan skema ini akan diperoleh hasil yang memuaskan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tampungan waduk dibedakan menjadi 2 yaitu tampungan awal dan tampungan akhir (*initial storage* dan *final storage*), maka dalam hal ini kedua tampungan tersebut masing-masing memiliki jumlah kelas yang sama pula.

Diskritisasi dari tampungan aktif waduk dalam 15 kelas dan nilai representatif yang mewakili kelas-kelas tersebut tersusun dan disajikan pada tabel berikut ini :

Tabel 5.2 Diskritisasi Tampungan (*Storage*) Waduk Saguling (MCM)

Kelas	Volume (MCM)			Volume Representatif (MCM)
1	< 0			0
2	0	-	47	23,5
3	47	-	94	70,5
4	94	-	141	117,5
5	141	-	188	164,5
6	188	-	235	211,5
7	235	-	282	258,5
8	282	-	329	305,5
9	329	-	376	352,5
10	376	-	423	399,5
11	423	-	470	446,5
12	470	-	517	493,5
13	517	-	564	540,5
14	564	-	611	587,5
15	> 611			611

Sumber : Hasil perhitungan

5.1.3 Data Evaporasi

Data hidrologi yang diperlukan dalam pengoptimasian waduk menggunakan program dinamik ini adalah data evaporasi yang menyebabkan berkurangnya tampungan air pada suatu waduk. Diharapkan dengan diketahui data ini akan diketahui pula berapa

besar kehilangan volume tampungan air pada waduk tersebut, walaupun pada kondisi sesungguhnya kehilangan volume tampungan dapat disebabkan oleh hal lain seperti rembesan pada waduk.

Data evaporasi waduk Saguling yang akan digunakan dalam perhitungan program dinamik stokastik didapat dari rata-rata bulanan tiap tahun yang disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 5.3 Laju Evaporasi Rata-rata (MCM)

Bulan	Evaporasi (m/bln)	Evaporasi (MCM)
Januari	0,021	1,12
Pebruari	0,035	1,87
Maret	0,04	2,14
April	0,04	2,14
Mei	0,041	2,19
Juni	0,043	2,30
Juli	0,047	2,51
Agustus	0,047	2,51
September	0,046	2,46
Oktober	0,042	2,24
Nopember	0,038	2,03
Desember	0,037	1,96

Sumber : SPK-TPA 2001

5.1.4 Data Target Pelepasan

Dalam pengoptimasian waduk Saguling menggunakan teknik program dinamik stokastik ini dibutuhkan suatu nilai/kondisi yang akan dicapai pada akhir pengoperasian seperti yang diharapkan, nilai/kondisi yang diharapkan tersebut dikenal dengan Target Tampungan dan Target Pelepasan.

Pada penelitian ini hanya menggunakan target pelepasan dalam perhitungan kinerja sistem waduk, tujuannya adalah agar dapat memaksimalkan pencapaian target pelepasan yang ditentukan. Persamaan tersebut sebagai berikut :

$$B_{k,i,l,t} = (R_{k,i,l,t} - TR_t)^2$$

Dimana : $B_{k,i,l,t}$ = Kinerja sistem

Salah satu contoh matrik probabilitas transisi inflow yaitu probabilitas terjadinya nilai inflow bulan Pebruari sebagai fungsi inflow bulan Januari disajikan dalam Tabel 5.5.

Seluruh matrik probabilitas transisi inflow ini selengkapnya ditampilkan dalam lampiran D.

Tabel 5.5. Matriks Probabilitas Transisi Kejadian Inflow di Bulan Pebruari sebagai Fungsi Inflow di Bulan Januari

				Kelas Inflow di Bulan Pebruari								
				89,199	-	250,018	250,019	-	410,838	410,839	-	571,657
				1			2			3		
Kelas Inflow	Bulan Januari	128,831	-	314,801	1	0,42		0,39		0,19		
		314,802	-	500,772	2	0,27		0,57		0,17		
		500,773	-	686,742	3	0,13		0,38		0,50		

5.2.2 Pola Operasi Waduk Optimasi

Proses-proses perhitungan dan tahapan-tahapan optimasi yang menggunakan program dinamik stokastik ini akan mendapatkan suatu keluaran yang penting yaitu pola operasi waduk pada masing-masing periode. Pola operasi ini merupakan suatu panduan untuk mengambil kebijakan seberapa besar tampungan akhir bulan yang sebaiknya ditentukan, yang nilai tampungan akhir ini merupakan fungsi dari tampungan waduk awal bulan dengan besarnya debit inflow yang masuk waduk pada periode tersebut.

Pola kebijakan operasi tersebut disusun selengkapnya dalam lampiran E, salah satu contoh pola kebijakan operasi waduk tersebut disajikan dalam tabel berikut.

Cara membaca pola kebijakan waduk ini adalah sebagai berikut :

1. Pola Kebijakan dibagi dalam 12 periode atau bulan maka pembacaan pola kebijakan wadukpun harus disesuaikan dengan bulan yang sedang berlangsung.
2. Pola kebijakan ini dapat dibaca jika telah diketahui data tentang tampungan pada awal bulan, yang merupakan data tampungan akhir bulan pada bulan sebelumnya. Misal data tampungan akhir pada bulan Januari adalah 450 MCM(Juta m³) akan merupakan data

tampungan mula-mula pada bulan Pebruari sebesar 450 MCM (juta m³) dalam tabel terdapat pada kelas tampungan 11 (lihat tabel 5.6).

3. Sedangkan data inflow yang terjadi adalah data inflow pada bulan sebelumnya yang teramati, sehingga data inflow pada bulan yang sedang berlangsung dapat diperkirakan dan ditentukan. Misal data Inflow teramati pada bulan Januari adalah 350 MCM (juta m³) terdapat di kelas 2 dari kelas tampungan inflow (lihat tabel 5.6).
4. Karena pola kebijakan yang dihasilkan ini adalah untuk membaca berapa besar tampungan akhir dari setiap periode, maka keluaranpun berupa tampungan akhir bulan, sehingga data yang terbaca pada pola pengoperasian bulan pebruari adalah kelas 12, yaitu rentang tampungan akhir yang disarankan adalah antara 470 - 517 MCM (juta m³) (lihat tabel 5.6).

Tabel 5.6

Pola Kebijakan Tampungan Akhir Bulan **Pebruari** yang Merupakan Fungsi Kelas
Tampungan Awal Bulan **Pebruari** dengan Kelas Inflow Bulan **Januari** Teramati

				Kelas Inflow di Bulan Januari		
				128,831 - 314,801	314,802 - 500,772	500,773 - 686,742
Satuan dalam MCM				243,34	385,681	587,273
Satuan dalam MCM				1	2	3
Kelas Tampungan Awal Bulan Pebruari	< 0	0,0	1	1	3	7
	0,00 - 47,00	23,5	2	2	4	7
	47,00 - 94,00	70,5	3	2	5	8
	94,00 - 141,00	117,5	4	3	6	9
	141,00 - 188,00	164,5	5	4	6	10
	188,00 - 235,00	211,5	6	5	7	11
	235,00 - 282,00	258,5	7	6	8	11
	282,00 - 329,00	305,5	8	6	9	12
	329,00 - 376,00	352,5	9	7	10	13
	376,00 - 423,00	399,5	10	8	11	14
	423,00 - 470,00	446,5	11	9	12	15
	470,00 - 517,00	493,5	12	10	12	15
	517,00 - 564,00	540,5	13	11	13	15
	564,00 - 611,00	587,5	14	12	14	15
	> 611	611,0	15	12	15	15

5.2.3 Pola Pelepasan Air (*Release*) Waduk

Bersamaan keluaran pola kebijakan operasional waduk di atas diperoleh juga pola pelepasan air oleh waduk hasil optimasi yang merupakan fungsi dari tampungan awal bulan/periode dengan masuknya inflow pada periode tersebut. Besarnya pelepasan air waduk tersebut dibatasi kondisi yaitu kurang dari atau sama dengan jumlah antara volume tampungan waduk awal periode/bulan dengan masuknya inflow waduk pada periode tersebut. Pola pelepasan (*release*) yang disajikan secara lengkap pada lampiran F dan salah satu dari pola pelepasan (*release*) tersebut disajikan dalam tabel berikut ini. Pembacaan pola pelepasan waduk ini, sama dengan pembacaan pola kebijakan tampungan akhir bulan, bedanya terletak pada keluaran yang berupa jumlah air yang dilepas.

Tabel 5.7. Pola Pelepasan Air Waduk Saguling Bulan Pebruari yang Merupakan Fungsi dari Tampungan Awal Bulan Pebruari dengan Inflow Bulan Januari
Satuan Juta M³ atau MCM

				Kelas Inflow di Bulan Januari					
				128,831 - 314,801		314,802 - 500,772		500,773 - 686,742	
				243,340		385,681		587,273	
				1		2		3	
Kelas Tampungan Awal Bulan Pebruari	< 0	0,0	1	242,220	314,061	327,653			
	0,00 - 47,00	23,5	2	242,220	290,561	351,153			
	47,00 - 94,00	70,5	3	289,220	290,561	351,153			
	94,00 - 141,00	117,5	4	289,220	290,561	351,153			
	141,00 - 188,00	164,5	5	289,220	337,561	351,153			
	188,00 - 235,00	211,5	6	289,220	337,561	351,153			
	235,00 - 282,00	258,5	7	289,220	337,561	398,153			
	282,00 - 329,00	305,5	8	336,220	337,561	398,153			
	329,00 - 376,00	352,5	9	336,220	337,561	398,153			
	376,00 - 423,00	399,5	10	336,220	337,561	398,153			
	423,00 - 470,00	446,5	11	336,220	337,561	421,653			
	470,00 - 517,00	493,5	12	336,220	384,561	468,653			
	517,00 - 564,00	540,5	13	336,220	384,561	515,653			
	564,00 - 611,00	587,5	14	336,220	384,561	562,653			
	> 611	611,0	15	359,720	384,561	586,153			

5.3 Program Simulasi

Setelah proses optimasi yang menggunakan program dinamik stokastik menghasilkan pola operasional waduk dan pola pelepasan air waduk, maka perlu dilakukan suatu proses untuk mengetahui bahwa kondisi waduk optimasi jika diterapkan pada kondisi realistis akan menunjukkan suatu hasil atau besaran yang diharapkan dalam target (*objective function*).

Proses tersebut adalah proses simulasi, seperti yang telah dijelaskan dalam bab-bab terdahulu. Beberapa kondisi dan keadaan yang dapat diperoleh dari program simulasi adalah suatu perbandingan antara kondisi eksisting dengan kondisi optimasi, yaitu :

1. Pola operasi berkaitan dengan pelepasan air (*release*) waduk
2. Produksi energi listrik dari waduk yang melalui turbin.
3. Keadaan tampungan akhir (*storage*) waduk pada setiap tahun operasi.

Kondisi eksisting adalah pola operasi waduk realisasi selama 6 tahun berturut-turut yaitu tahun 1996 sampai tahun 2001. Keluaran program simulasi ini ditampilkan dalam penjelasan sebagai berikut

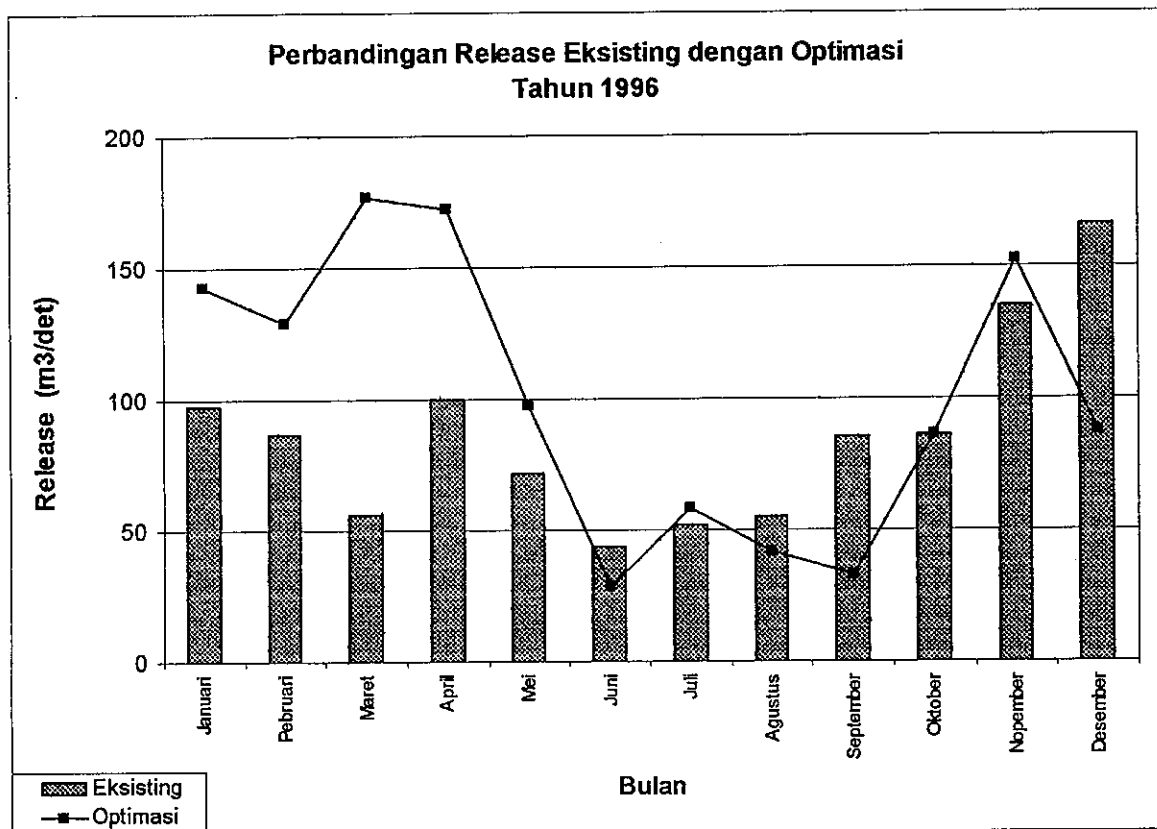
5.3.1 Pola Operasi Optimasi dan Eksisting

Pola operasi yang dimaksud adalah suatu grafik yang menunjukkan besarnya air yang harus dikeluarkan pada setiap bulan yang didasarkan pada jumlah inflow yang masuk ke waduk dan volume tampungan awal dan akhir yang dikehendaki. Dalam simulasi ini terlihat berapa besar air yang dikeluarkan pada kondisi eksisting dan kondisi optimasi selama 6 tahun yaitu dari tahun 1996 sampai tahun 2001.

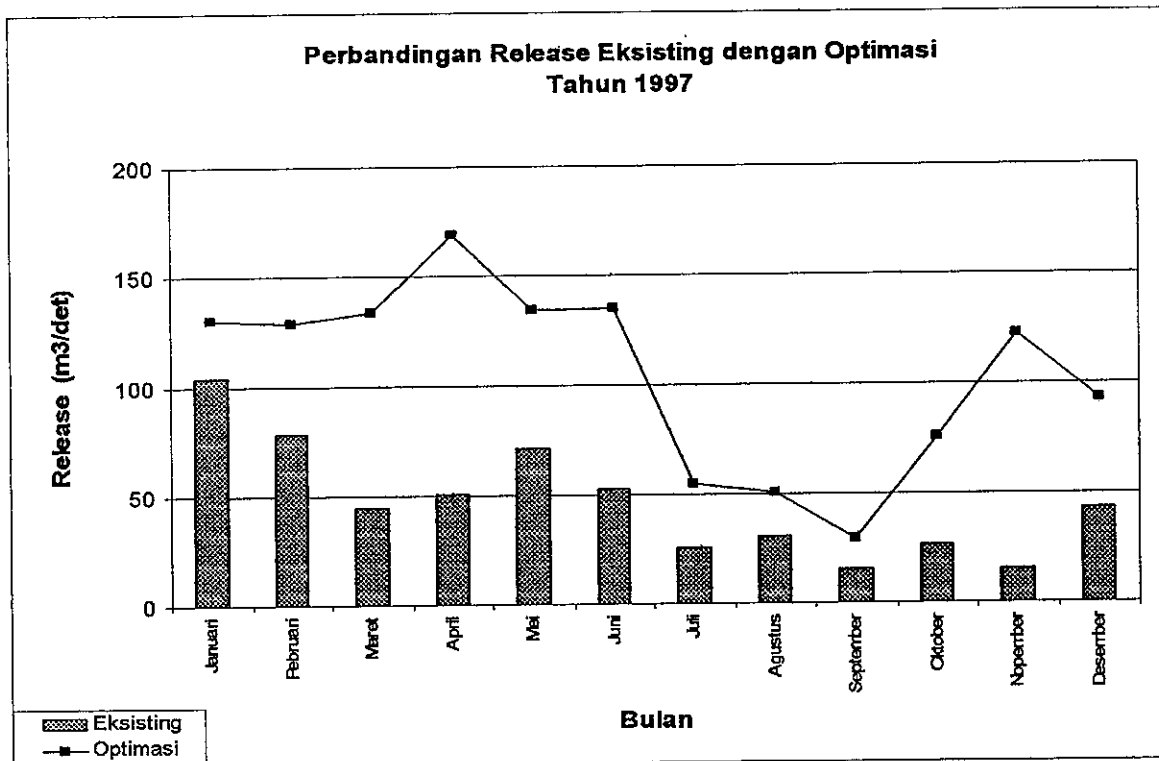
Dari gambar-gambar pola pelepasan air (*release*) waduk, tampak bahwa grafik yang dihasilkan oleh pola operasi waduk optimasi memiliki kecenderungan yang sama

grafik yang dihasilkan oleh kondisi waduk eksisting. Hal ini menunjukkan bahwa program optimasi dinamik stokastik dapat mengakomodasi berbagai fenomena alam yang ada.

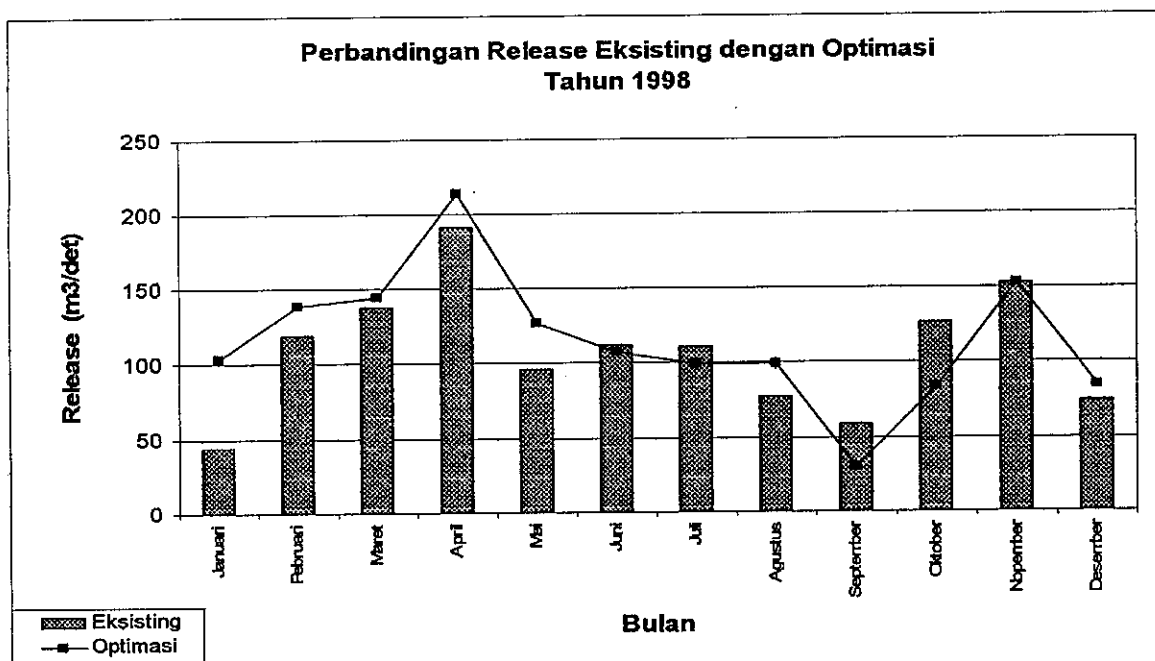
Pola operasi waduk untuk kondisi optimasi dan eksisting ini ditampilkan lebih lengkap pada gambar-gambar di bawah ini.



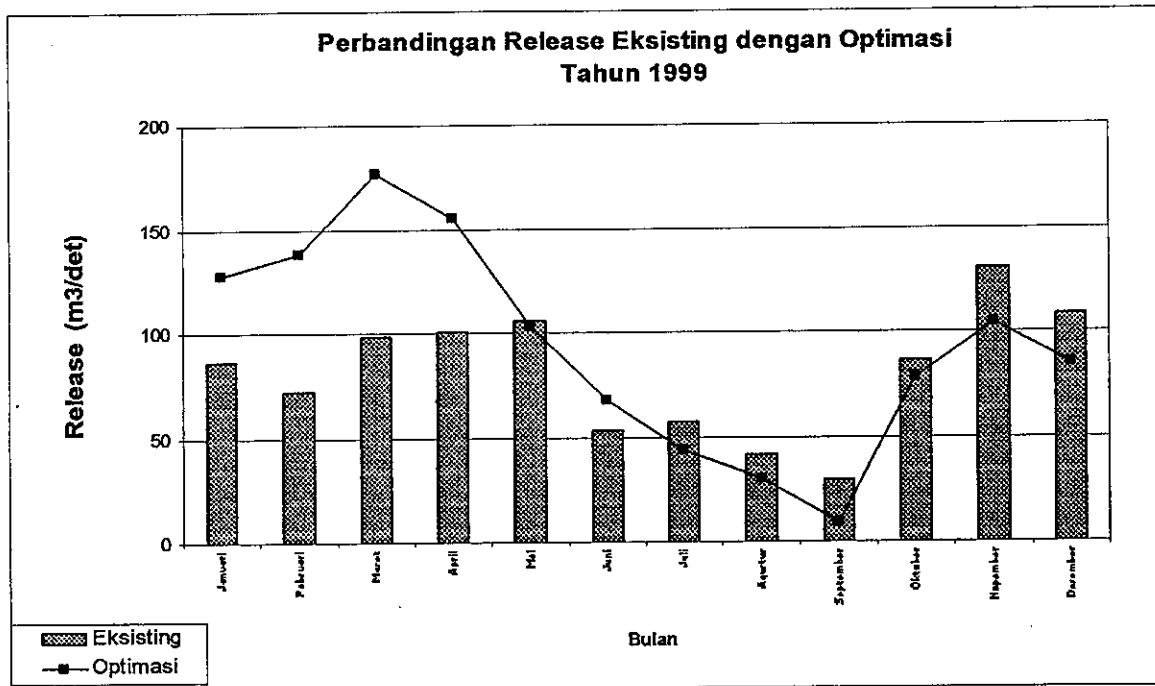
Gambar 5.1. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting
Tahun 1996



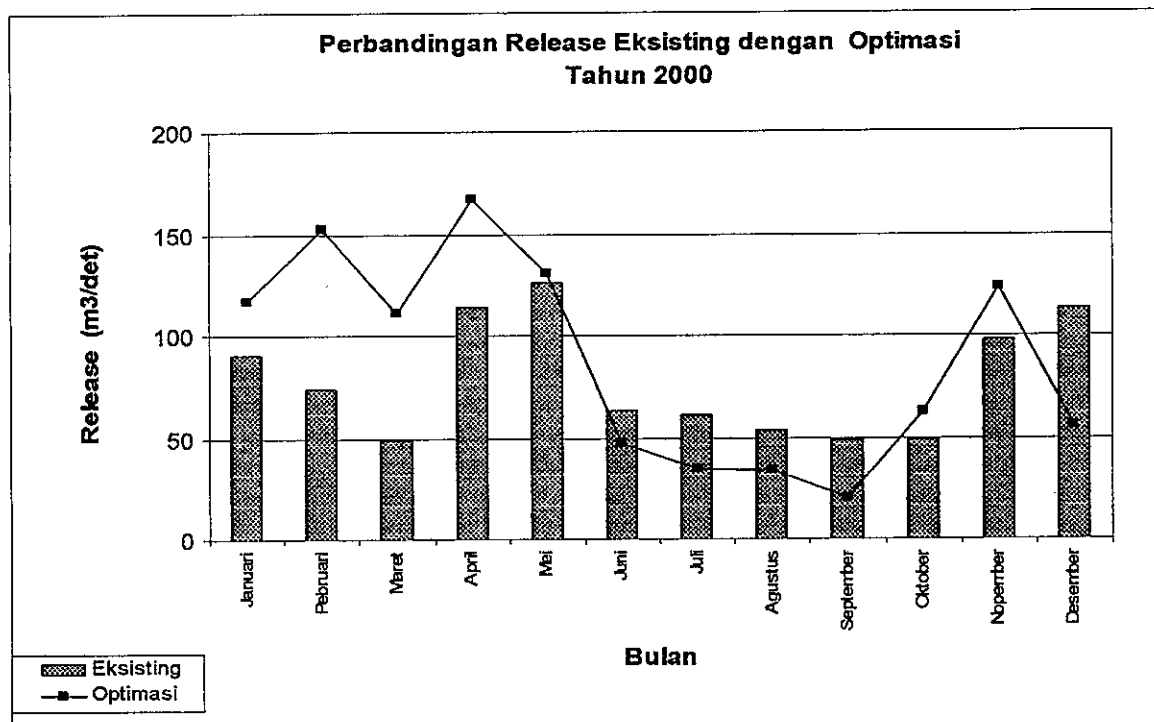
Gambar 5.2. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting
Tahun 1997



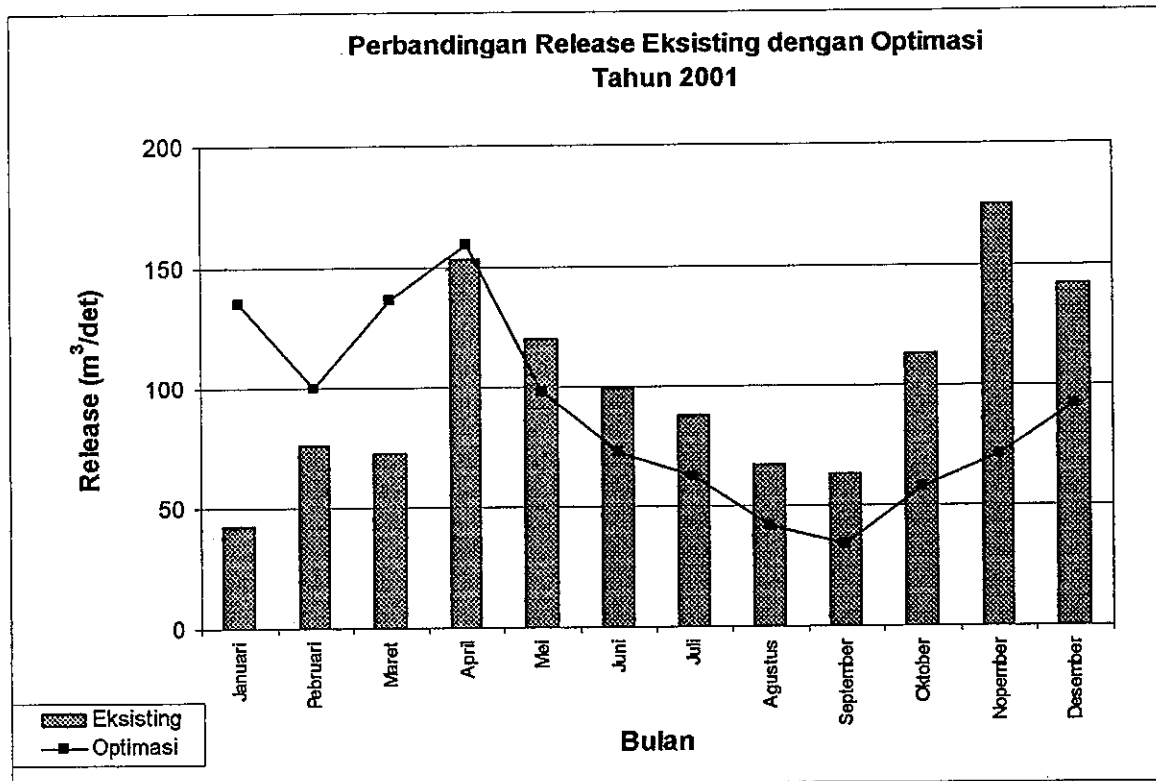
Gambar 5.3. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting
Tahun 1998



Gambar 5.4. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting
Tahun 1999



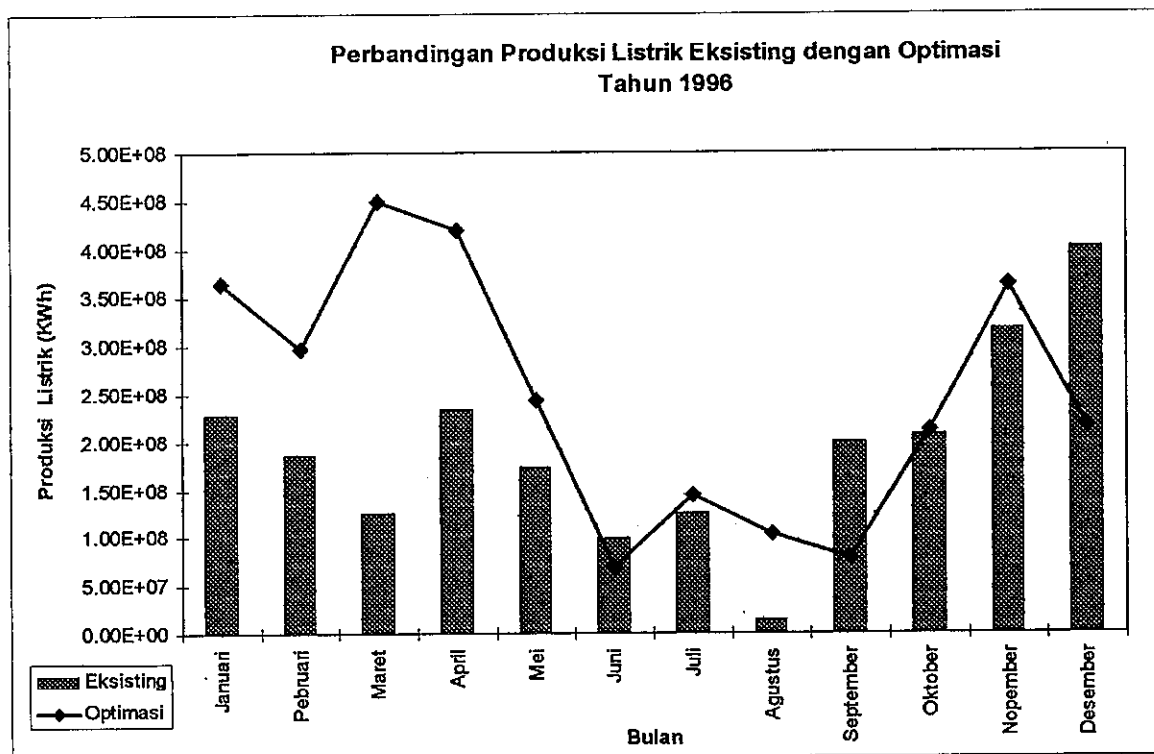
Gambar 5.5. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting
Tahun 2000



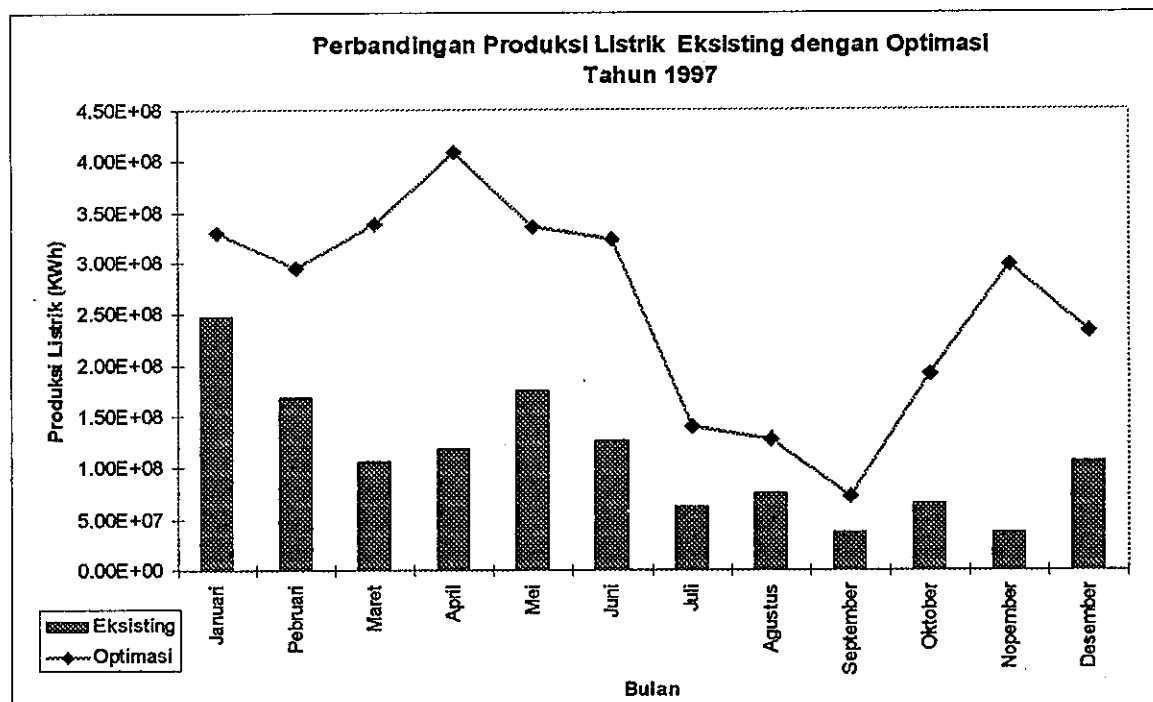
Gambar 5.6. Perbandingan Pola Operasi Simulasi Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2001

5.3.2 Produksi Energi Listrik Optimasi dan Eksisting

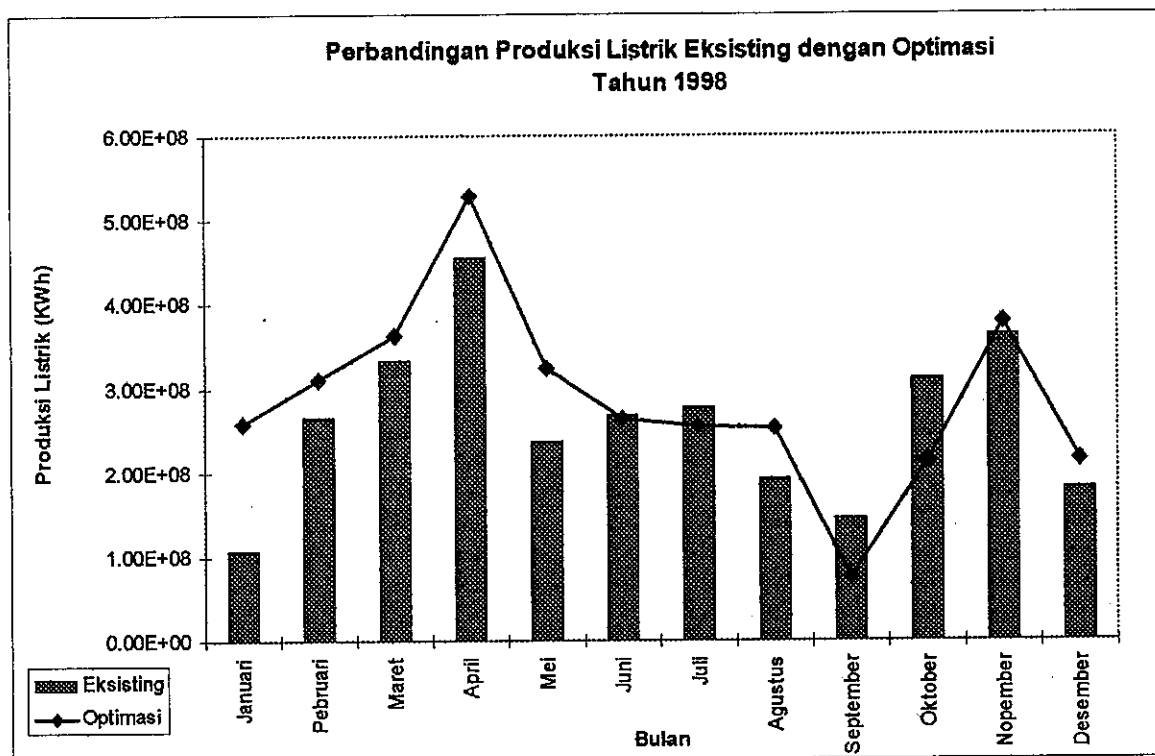
Simulasi terhadap waduk Saguling yang menggunakan pola operasi hasil optimasi selama 6 tahun yaitu tahun 1996 - 2001 menunjukkan peningkatan produksi listrik jika dibandingkan dengan pola operasi waduk eksisting, hal ini tampak dalam uraian grafik berikut ini:



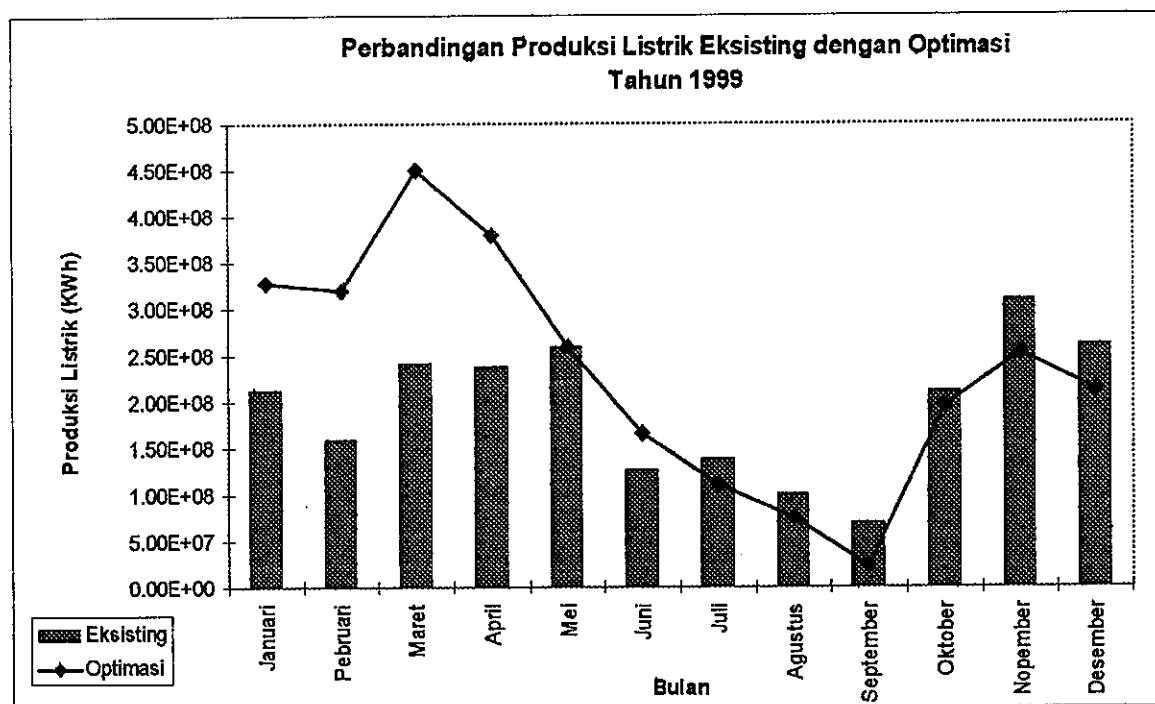
Gambar 5.7. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1996



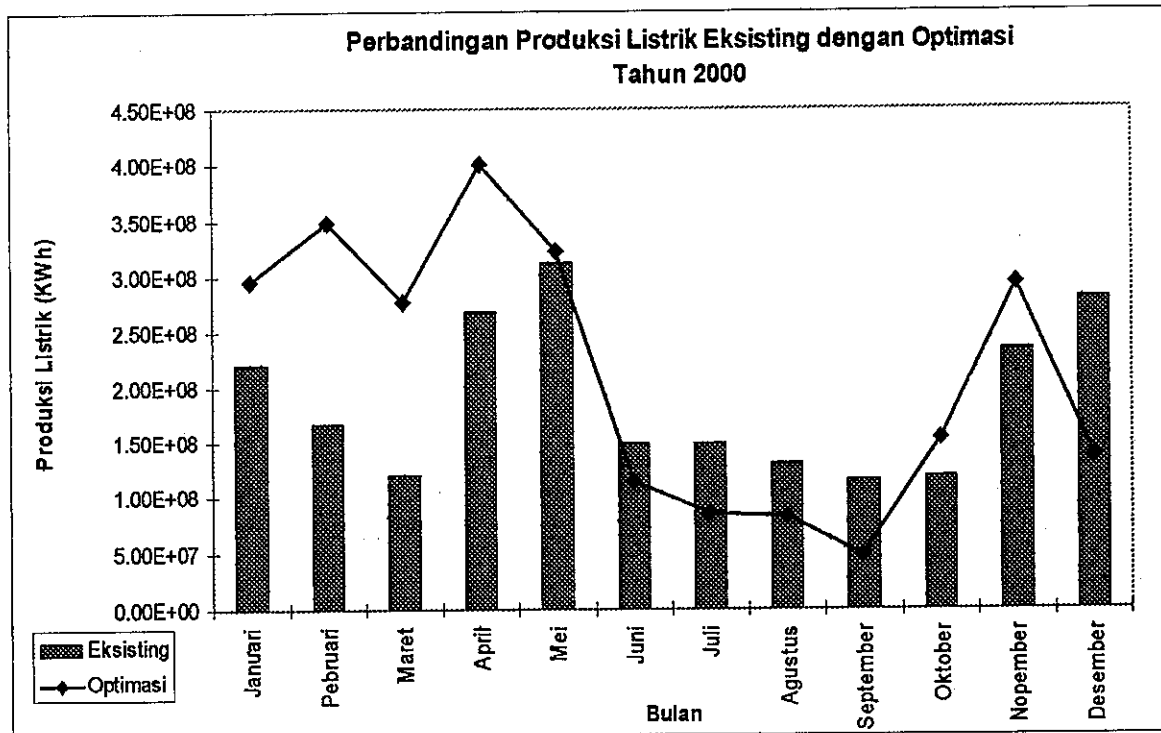
Gambar 5.8. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1997



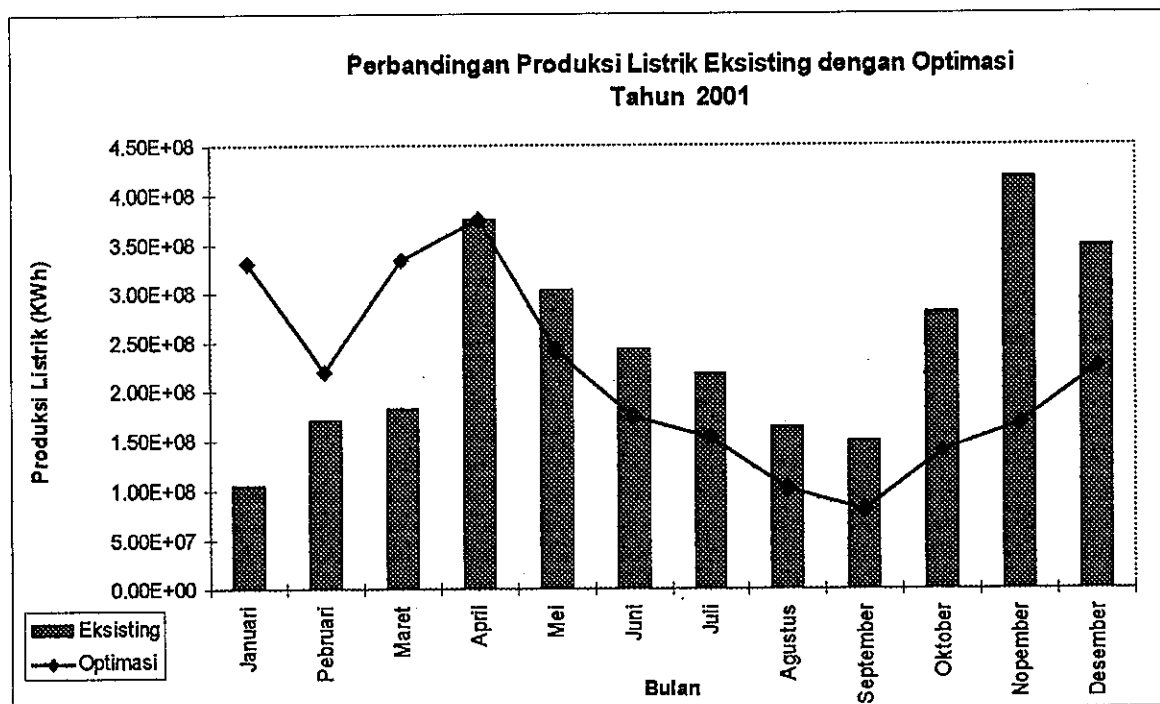
Gambar 5.9. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1998



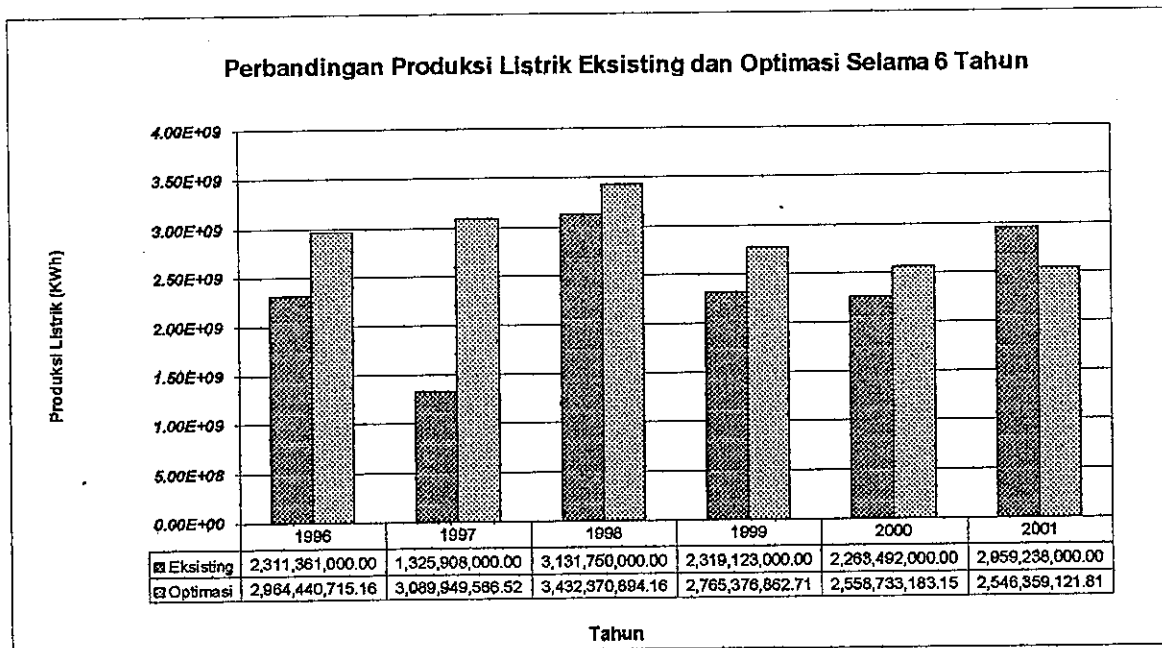
Gambar 5.10. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 1999



Gambar 5.11. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2000



Gambar 5.12. Perbandingan Produksi Listrik Waduk Optimasi dengan Eksisting Tahun 2001



**Gambar 5.13. Perbandingan Produksi Energi Listrik Total Hasil Simulasi
Waduk Eksisting dan Optimasi Tahun 1996-2001**

Hasil Simulasi waduk selama 6 tahun yaitu tahun 1996 sampai tahun 2001 yang ditampilkan pada grafik di atas menunjukkan bahwa dengan penggunaan pola kebijakan operasi berdasarkan program optimasi stokastik mengalami peningkatan dalam produksi listrik tahunan sebesar 21,29 % dari 2.385 GWH menjadi 2.892 GWH.

Walaupun produksi energi listrik tahunan total hasil optimasi lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi eksisting, akan tetapi pada bulan-bulan tertentu produksi energi eksisting lebih besar dari hasil optimasi. Kejadian ini terjadi pada umumnya pada bulan Juli – September yang merupakan bulan-bulan kering/kemarau.

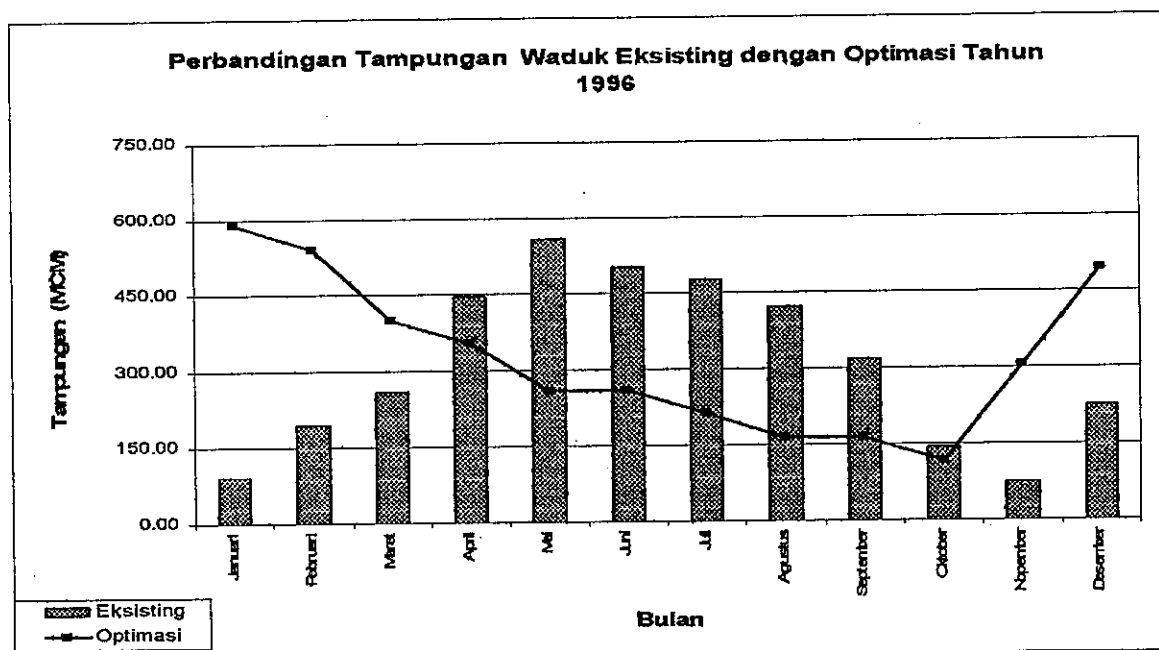
Pada simulasi tahun 2001 terjadi penurunan produksi listrik, hal ini disebabkan karena air yang dikeluarkan ditahan untuk menjaga volume waduk agar tetap stabil, namun demikian besarnya selisih produksi antara tahun eksisting tidak terlalu jauh yaitu 13,9 % dengan produksi listrik optimasi.

5.3.3 Kondisi Tampungan Waduk Eksisting dan Optimasi

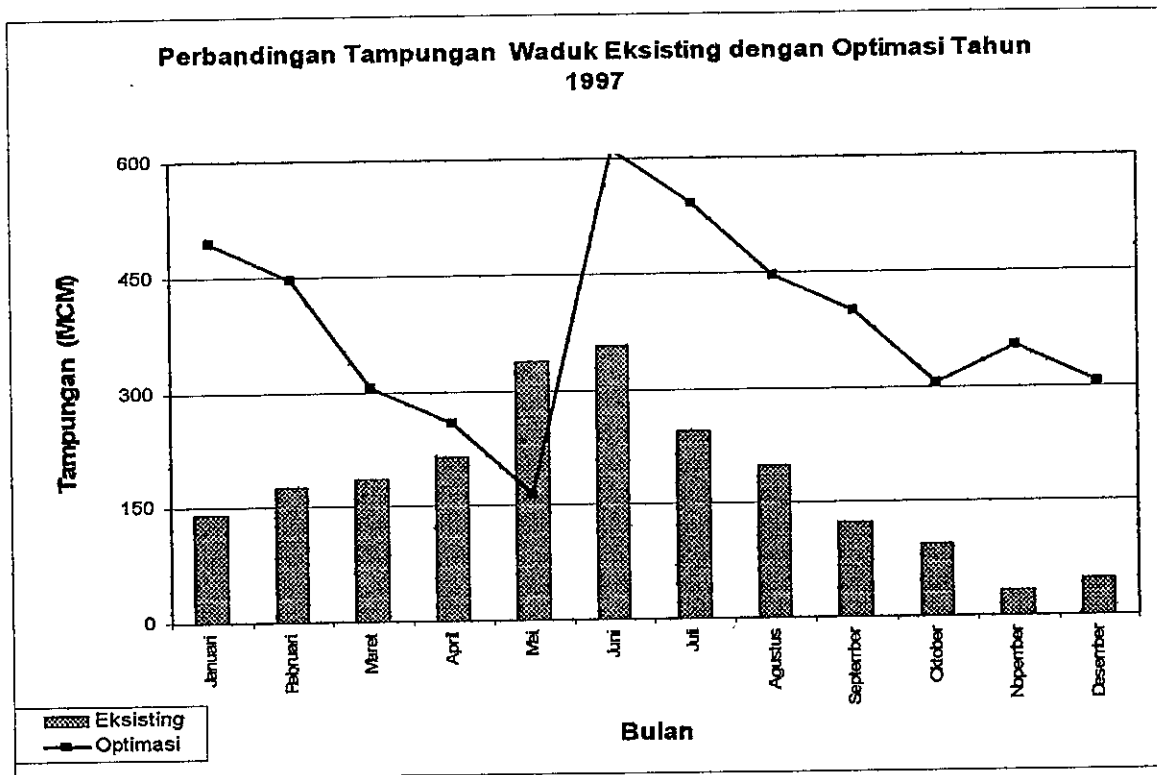
Tujuan utama dalam sebuah pengoptimasian adalah menghasilkan suatu keluaran yang semaksimal mungkin, misalnya untuk memaksimalkan produksi listrik pada suatu pengoperasian waduk.

Namun pada pengoptimasian waduk menggunakan program dinamik stokastik ini disamping bertujuan untuk memaksimalkan produksi listrik dengan sebesar-besarnya juga bertujuan untuk menjaga kondisi tampungan waduk, sehingga kondisi waduk tidak mengalami kekosongan. Kekosongan waduk ini minimal akan mengurangi fungsi dari waduk menjadi tidak efisien dan tidak efektif.

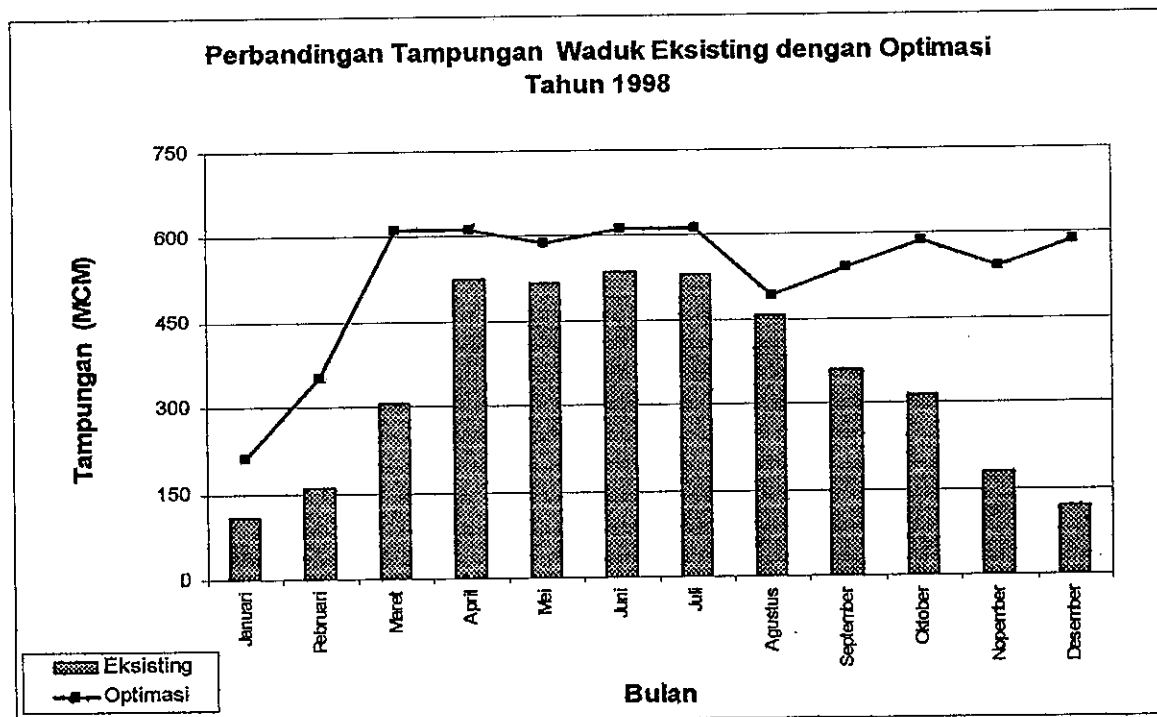
Beberapa grafik di bawah ini menunjukkan besarnya tampungan waduk pada tiap bulan operasi dari simulasi waduk selama 6 tahun yaitu tahun 1996 sampai tahun 2001, untuk kondisi waduk pengoperasian eksisting dan pengoperasian waduk dengan pola pengoperasian waduk optimasi.



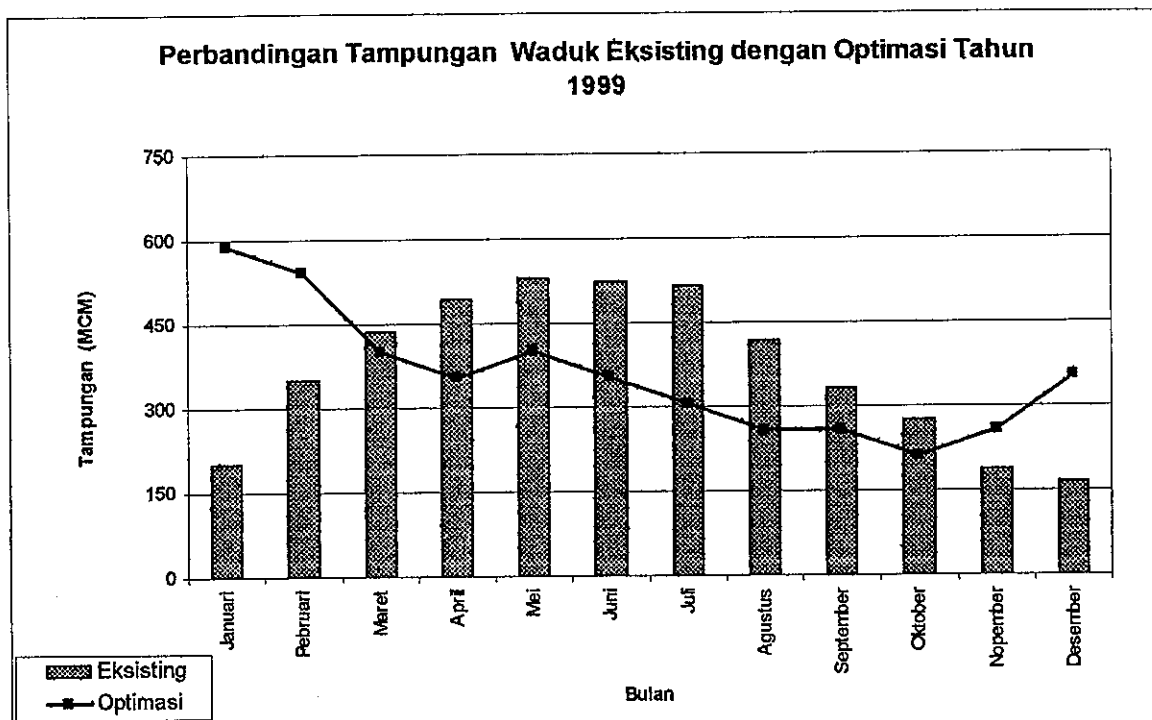
Gambar 5.14. Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 1996



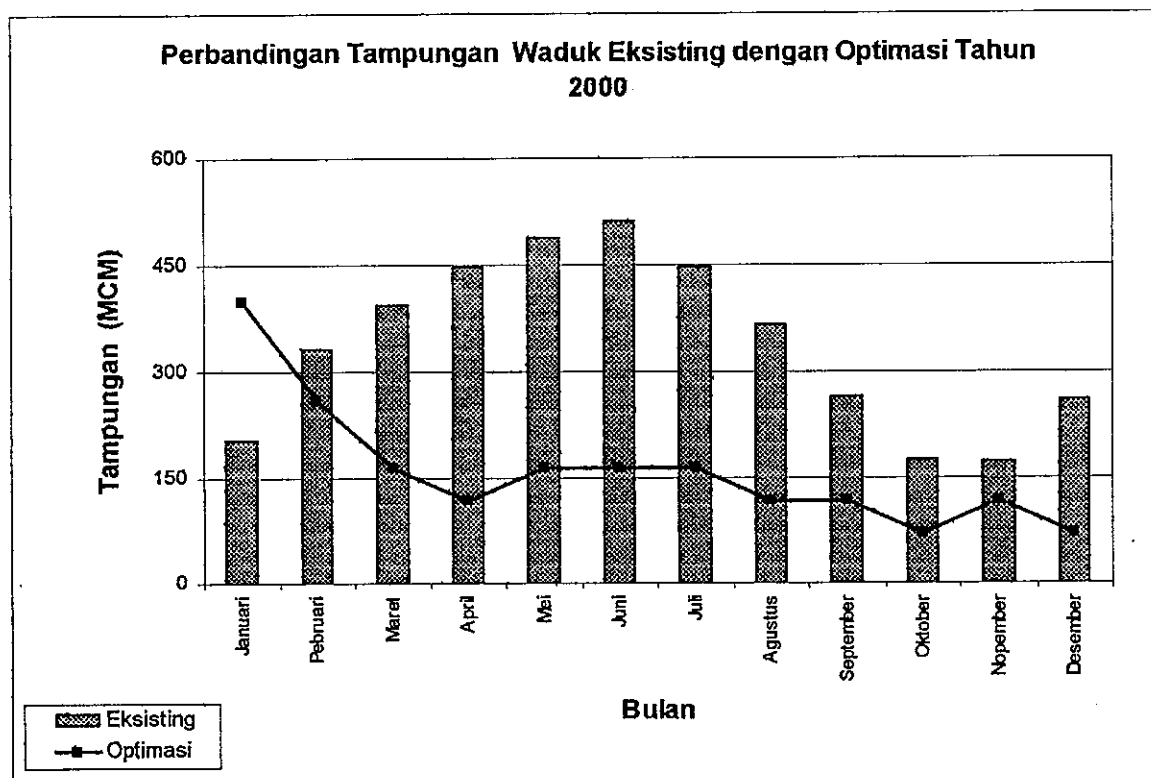
Gambar 5.15. Perbandingan Tampungn Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 1997



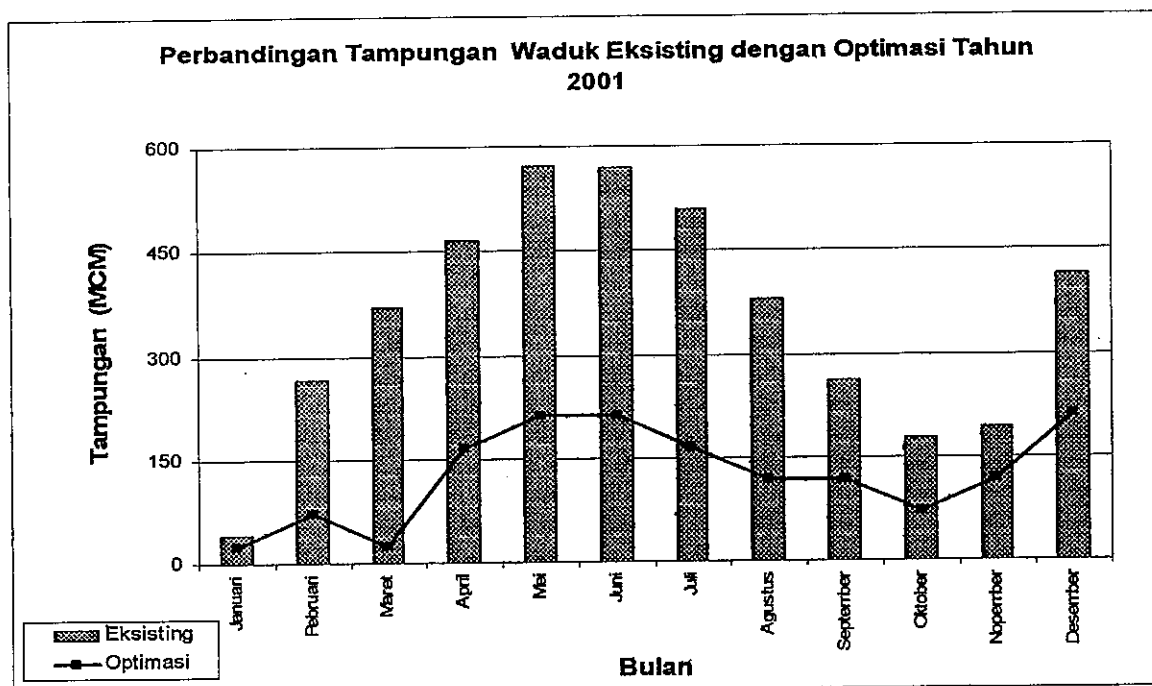
Gambar 5.16. Perbandingan Tampungn Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 1998



Gambar 5.17. Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 1999



Gambar 5.18. Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 2000



Gambar 5.19. Perbandingan Tampungan Waduk Hasil Simulasi Kondisi Eksisting dengan Optimasi Tahun 2001

Dari grafik di atas tampak bahwa pada suatu kondisi tampungan waduk eksisting lebih tinggi dari kondisi tampungan waduk hasil optimasi, demikian juga sebaliknya, namun pola garis tampungan pada waduk hasil optimasi umumnya memiliki kecenderungan yang sama, seperti saat tampungan rendah, kondisi tampungan optimasi juga rendah demikian juga saat kondisi waduk eksisting tinggi, kondisi tampungan optimasi juga tinggi.

Keadaan tampungan nol tidak pernah dialami pada kondisi waduk hasil optimasi yang ini merupakan kondisi yang dihindari pada pengoperasian waduk. Hal ini menunjukkan bahwa pengoperasian waduk optimasi telah dapat mengakomodir beberapa fenomena alam yang tidak tetap atau berubah-ubah seperti datangnya inflow yang ditimbulkan oleh hujan maupun kehilangan air waduk akibat penguapan sehingga besarnya air yang dikeluarkan (*release*) tidak mengakibatkan kekosongan waduk.

5.3.4 Kinerja Waduk

1. Keandalan (*Reliability*)

Unjuk kerja berupa keandalan berfungsi untuk mengukur kemampuan waduk untuk memenuhi fungsinya yaitu memenuhi kebutuhannya, dalam hal ini memenuhi target pelepasan waduk. Waduk dianggap gagal apabila hasil pengoperasian tidak dapat memenuhi kebutuhan target pelepasan secara keseluruhan tersebut. Persamaan unjuk kerja yang digunakan untuk keandalan adalah :

$$Z_t = \begin{cases} 1 & \text{untuk } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{untuk } R_t < D_t \end{cases}$$

Total bulan operasi simulasi tahun 1996 -2001 adalah $6 \times 12 = 72$, $n = 72$. Total bulan dalam keadaan gagal adalah 6 berarti total bulan yang sukses adalah 66. Keandalan (*Reliability*) waduk Saguling berdasarkan persamaan berikut adalah :

$$\alpha_1 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t$$

$$\alpha = 66 / 72 \times 100 \%$$

$$= 91,67 \%$$

Artinya apabila waduk dioperasikan sesuai dengan hasil optimasi maka pada bulan-bulan tertentu waduk tidak dapat memenuhi kebutuhan untuk PLTA.

2. Kelentingan (*Resiliency*)

Indikator ini untuk mengukur kemampuan waduk untuk kembali ke keadaan memuaskan dari keadaan gagal. Jika semakin cepat waduk kembali ke keadaan memuaskan maka dapat dikatakan bahwa waduk lebih lenting sehingga konsekuensi dari kegagalan lebih kecil.

Seperti yang telah dijelaskan pada bahasan tinjauan pustaka, maka perhitungan kelentingan ini ada terdapat beberapa parameter yaitu:

1. Perhitungan masa transisi dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan dituliskan dengan variabel "Wt" sebagai berikut :

$$W_t = \begin{cases} 1 & \text{jika } R_{t-1} \leq D_{t-1} \text{ dan } R_t \geq D_t \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases}$$

2. Dalam jangka panjang, nilai rerata dari "Wt" akan menunjukkan jumlah rerata terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal menjadi keadaan memuaskan. Jumlah rerata terjadinya transisi ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t$$

dimana ρ menunjukkan probabilitas (rerata frekwensi) terjadinya transisi waduk dari keadaan gagal ke keadaan memuaskan.

3. Jangka waktu rerata waduk dalam keadaan gagal secara kontinu merupakan jumlah total waktu rerata waduk mengalami gagal dibagi dengan frekwensi rerata terjadinya transisi waduk dan secara matematis dapat dituliskan berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{\sum_{t=1}^n (1 - Z_t^1)}{\sum_{t=1}^n W_t}$$

dimana : T_{gagal} = jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinu

4. Dalam jangka panjang, jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal secara kontinu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T_{\text{gagal}} = \frac{1 - \alpha_1}{\rho}$$

Semakin lama jangka waktu rerata waduk berada dalam keadaan gagal maka semakin kecil kelentingannya sebagai akibatnya maka konsekuensi dari keadaan gagal tersebut juga akan besar.

5. Oleh karenanya indikator kelentingan didefinisikan sebagai γ_1 berikut :

$$\gamma_1 = \frac{1}{T_{\text{gagal}}} = \frac{\rho}{1 - \alpha_1}$$

dimana :

γ_1 = Kinerja kelentingan

Dari hasil simulasi didapatkan nilai dari besaran di atas sebagai berikut,

1. W_t = 6
2. ρ = $6 / 72 = 0,0833$
3. T_{gagal} = $6 / 6 = 1$
4. γ_1 = $1 / 1 = 1$

Nilai 1 ini menunjukkan kelentingan yang cukup sehingga jika terjadi waduk yang mengalami kegagalan akan segera kembali sukses dalam artian kemungkinan untuk kembali dari keadaan gagal ke sukses adalah 100% atau dibutuhkan waktu 1 bulan untuk kembali ke keadaan sukses.

3. Kerawanan (*Vulnerability*)

Unjuk kerja berupa kerawanan berfungsi untuk menentukan atau mengukur seberapa besar rawan suatu kegagalan jika terjadi kegagalan. Dalam hal ini jika terjadi kegagalan maka dapat diukur seberapa besar suatu kegagalan yang terjadi.

Dalam studi kerawanan ada beberapa parameter yang terkait di dalamnya antara lain :

1. Nilai kekurangan (DEF_t) air pelepasan dari kebutuhannya, nilai DEF, didefinisikan sebagai berikut :

$$DEF_t = \begin{cases} D_t - R_t & \text{jika } R_t \leq D_t \\ 0 & \text{jika } R_t \geq D_t \end{cases}$$

2. Nilai rerata "*deficit ratio*"

$$v_1 = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{DEF_t}{D_t} \right)}{\sum_{t=1}^n W_t}$$

3. Nilai maksimum "*deficit ratio*"

$$v_2 = \max_t \left\{ \frac{DEF_t}{D_t} \right\}$$

4. Nilai maksimum "*deficit*"

$$v_3 = \max_t \{DEF_t\}$$

Dari perhitungan simulasi maka didapat nilai seperti pada parameter di atas adalah sebagai berikut :

1. Nilai kekurangan (DEF_t) air pelepasan dari kebutuhannya $DEF_t = 106,10 \text{ m}^3/\text{det}$
2. Nilai rata-rata '*deficit ratio*' $v_1 = 1,02 / 12 = 0,085$
3. Nilai maksimum '*deficit ratio*' $v_2 = 0,37$
4. Nilai maksimum '*deficit*' $v_3 = 26,408 \text{ m}^3/\text{det}$

Hasil perhitungan kinerja waduk dengan menggunakan pola pengoperasian waduk optimasi disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 5.8. Rekapitulasi Perhitungan Kinerja Waduk Saguling

Keandalan	Kelentingan	Kerawanan		
α	γ	v_1	v_2	v_3
91,67 %	1	0,085	0,37	26,408 m ³ /det

Sumber : hasil simulasi dan perhitungan

Dari rekapitulasi kinerja waduk Saguling memiliki tingkat keandalan sebesar 91,67 % mengindikasikan bahwa waduk pada bulan-bulan tertentu terutama pada bulan-bulan yang besarnya inflow minimum berada pada kelas 1 pada tiap periode akan terjadi kegagalan. Untuk kembali ke kondisi sukses dibutuhkan waktu 1 bulan karena kelentingannya besar yaitu 1. Besarnya *deficit ratio* dari besarnya target pelepasan dalam pemenuhan kebutuhan adalah 0,085 yang mengindikasikan hanya 0,85% kebutuhan air dari PLTA tidak terpenuhi pada suatu kegagalan. Nilai maksimum *deficit ratio* adalah 0,37 dan besarnya *deficit* dari waduk Saguling maksimum adalah 26,408 m³/det.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan untuk optimasi waduk Saguling dengan menggunakan program dinamik stokastik dan simulasi maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dalam analisa optimasi Sumber Daya Air penerapan teknik analisis sistem sangat membantu pengoptimalan pemanfaatan Sumber Daya Air, seperti pada waduk.
2. Penggunaan teknik optimasi program dinamik stokastik pada waduk Saguling yang digabungkan dengan simulasi menghasilkan pola pengoperasian waduk (**lihat Lampiran E, F dan G**) yang memperhatikan pola stokastik inflow dan hasilnya bisa dijadikan pedoman dalam pengelolaan dan pengoperasian waduk secara nyata, karena disamping dapat meningkatkan produksi energi listrik juga dapat memberikan gambaran tentang kemungkinan yang terjadi jika dioperasikan.
3. Berdasarkan hasil simulasi waduk Saguling dalam tahun terakhir (Tahun 1996 – 2001) maka pola operasi waduk yang berdasarkan program optimasi stokastik mengalami peningkatan dalam produksi listrik rata-rata tahunan sebesar 21,29 % dari 2.385 GWH menjadi 2.892 GWH.
4. Dari simulasi waduk yang memeriksa kinerja waduk Saguling dalam tahun terakhir (Tahun 1996 – 2001) dengan berdasarkan pola pengoperasian optimal, waduk memiliki tingkat keandalan 91,67 % mengindikasikan bahwa waduk pada bulan-bulan tertentu terutama pada bulan-bulan yang besarnya inflow minimum berada pada kelas 1 pada tiap periode akan terjadi kegagalan. Untuk kembali ke

kondisi sukses dibutuhkan waktu 1 bulan karena kelentingan sebesar 1. Besarnya *deficit ratio* dari besarnya target pelepasan dalam pemenuhan kebutuhan adalah 0,085 yang mengindikasikan hanya 0,85% kebutuhan air dari PLTA tidak terpenuhi pada suatu kegagalan. Nilai maksimum *deficit ratio* adalah 0,37 dan besarnya *deficit* dari waduk Saguling maksimum adalah 26,408 m³/det.

6.2 Saran

Saran yang berkaitan dengan penelitian ini untuk pengembangan dan peningkatan ataupun tindak lanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Penyusunan pola pengoperasian waduk dalam penelitian ini digunakan periode bulanan, maka untuk penelitian lebih lanjut disarankan menggunakan periode yang lebih pendek, sehingga dapat mendekati sistim yang sebenarnya.
2. Penelitian dapat ditingkatkan dengan meninjau beberapa *objective function* yang lain, seperti tinjauan ekonomi, pengaruh sedimentasi dan pengendalian banjir.
3. Pengoptimasian waduk dapat dikembangkan dengan menggunakan sistem serial antara waduk-waduk yang ada di sepanjang sungai Citarum.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arismunandar A., dan Kuwahara S., 1991. *Teknik Listrik* (Jilid I: Pembangkit dengan Tenaga Air), PT. Pradnya Paramita. Jakarta.
2. Budienny H., 2000, *Analisa Optimasi Pengelolaan Sumber Daya Air Waduk Sermo*, Tesis Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Ilmu-ilmu Teknik, Program Pasca Sarjana Universitas Gajah Mada Yogyakarta, Yogyakarta.
3. Bogardi, J.J., 1988. *Lecture Note on Advanced Techniques in Water Resources Planning and Management*, Divisi of Water Resources Planning and Management, AIT, Bangkok
4. Dandekar, M. M., dan K. N. Sharma; Penterjemah, D. Bambang Setyadi, Sutanto. 1991, *Pembangkit Listrik Tenaga Air*, Cet. I, Penerbit Universitas Indonesia. Jakarta.
5. Dimiyati, Tjutju Tarlihah, 1992, *Operation Research*, Edisi ke-2, C.V. Sinar Baru, Bandung.
6. Garg, 1982, *Water Resources and Hydrology*, fourth edition, Khanna Publishers, New Delhi
7. Goulter, I. C., 1981, *Optimization of Civil Engineering Systems*, Course Notes, University of Manitoba, Associate Professor of Civil Engineering.
8. Gunawan, G., 2002, *Optimasi Multiwaduk Serial dengan Program Linier dan Simulasi*, Tesis Program Magister Teknik Sipil Konsentrasi Sumber Daya Air Universitas Diponegoro, Semarang.
9. Gustiana, Dewi, 1998, *Potensi Aliran Sungai di Jawa Barat Belum Dimanfaatkan Secara Optimal*, Artikel Harian Umum Republika, Jakarta.
10. Hall, W.A. and Dracup, J.A., 1970, *Water Resources System Engineering*, Mc. Graw Hill Book Co, New York, U.S.A.
11. Kasiro, Ibnu, dkk. 1995, *Bendungan Besar di Indonesia*, Yayasan Badan Penerbit PU. Jakarta.
12. Linsley, Ray K., dkk., Penterjemah, Yandi Hermawan., 1986, *Hidrologi Untuk Insinyur*, Penerbit Erlangga, Jakarta.

13. Linsley, Ray K., 1985, *Teknik Sumber Daya Air*, Jilid I dan II, Penerbit Erlangga, Jakarta
14. Loucks, Daniel P. dkk., 1981, *Water Resources System Planning and Analysis*, Prentice Hall, New Jersey.
15. Loucks, Daniel P. dkk., 1984, *Stochastic Dynamic Programming Model of Reservoir Operation Optimization*, Water Resource Research, Vol. 20, No. 11, pp. 1499-1505
16. Nugroho, Hari, 1999, *Menuju Optimalisasi Eksploitasi Energi Sumber Daya Air*, Tesis, ITB, Bandung
17. NTIS, 1983, *Optimal Operation of a Multiple Reservoir System*, California University, Davis.
18. Petrus, S., 1997, *Perencanaan Debit Air Masuk ke Waduk Kaskade Citarum*, PUSLITBANG Pengairan, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.
19. Qomariyah, S., 1992., *Analisa Perhitungan Kapasitas Waduk Menggunakan model Simulasi dan Optimasi*, Jurnal Penelitian dan pengembangan Pengairan, no. 25, TH. 7-KWIII, pp. 61-64.
20. Rao, S. S., 1978, *Optimization, Theory and Applications*, Edisi 2, Wiley Eastern Limited, New Delhi.
21. Santoso, Tukul dan Suladjono, 1995, *Pengoperasian Waduk Kaskade Citarum*, Makalah Seminar "Reservoir Operation and Sedimentation" pp 1-28 Jakarta.
22. Sheresta, D.L, 1987, *Optimum Hydropower System Configuration Considering Operational Aspects*, Master Thesis, AIT, Bangkok
23. Solichin, 1993, *Optimasi Operasi Sistem Multi Waduk dengan Menggunakan Program Dinamik Stokastik*, Thesis, ITB. Bandung.
24. Sosrodarsono, S., dan Takeda. K., 1987, *Hidrologi untuk Pengairan*, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta.
25. Suharyanto, 1997, *Application of Stochastic Dynamic Programming in Reservoir Operation Rule Generation*, Central Queensland University, Australia.
26. Suharyanto, 1997, *Analisis Unjuk Kerja Pengoperasian Waduk*, Media Komunikasi Teknik Sipil, Edisi VIII, pp 51-57
27. Sumarto, C. D., 1986, *Hidrologi Teknik*, Edisi-2, Penerbit Erlangga, Jakarta.

-
28. Suwarno, 1995, *Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*, Penerbit NOVA, Bandung.
 29. Sudjarwadi, 1989, *Pola Operasi Pengoperasian Waduk*, PAU IT-UGM, Yogyakarta.
 30. Tarigan, Abinteras, 2001, *Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Kedung Ombo dengan Program Linear*, Tesis, Magister Teknik Sipil UNDIP, Semarang.
 31. Thaha, Hamdi A., 1987, *Operation Research: A Introduction*, 5th ed, Hamilton Printing Company, USA.
 32. Turgeon, Andre, 1980, *Optimal Operation of Multi Reservoir Power System with Stochastic Inflows*, Journal of Water Resources Research, vol. 16, No. 2, pp 275-283, American Geophysical Union.
 33. Walpole, Ronald E., 1986, *Ilmu Peluang dan Statistika untuk Insinyur dan Ilmuwan*, Penerbit ITB, Bandung.
 34. Wurbs, R. A., 1987, *Modeling and Analysis of Reservoir System Operation*, Prentice-Hall, Inc, USA
 35. Yeh, W. W-G., 1985, *Reservoir Management and Operations Models: A State of the Art Review*, Water Resources Research. Vol. 21, pp 1797-1818, the American Geophysical Union.